



**Contribution à l'analyse des interactions entre histoire
et didactique des sciences. Elaboration d'un support
d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour
l'école primaire et le collège et premiers éléments
d'évaluation.**

C. de Hosson

► **To cite this version:**

C. de Hosson. Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Elaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation.. domain_stic.educ. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2004. Français. NNT : . tel-00083593

HAL Id: tel-00083593

<https://theses.hal.science/tel-00083593>

Submitted on 3 Jul 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris 7-Denis Diderot
UFR Physique

THESE

Présentée pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Didactique des Disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques

Par Cécile de HOSSON

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES INTERACTIONS ENTRE HISTOIRE ET DIDACTIQUE DES SCIENCES

ELABORATION D'UN SUPPORT D'ENSEIGNEMENT DU MECANISME OPTIQUE DE LA VISION
POUR L'ÉCOLE PRIMAIRE ET LE COLLEGE ET PREMIERS ELEMENTS D'ÉVALUATION

Soutenue le 24 novembre 2004 devant la commission d'examen constituée de :

M. Pierre LENA
Mme Laurence VIENNOT
M. Michel BLAY
M. Paolo GUIDONI
Mme Wanda KAMINSKI
M. Jean GAYON

Président

Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Directeur de thèse

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Pierre Léna qui me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, ainsi que Monsieur Michel Blay et Monsieur Paolo Guidoni qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Depuis mes années de DEA, j'ai eu le plaisir de bénéficier d'échanges toujours passionnants avec Laurence Viennot. J'ai toujours pu compter sur ses conseils avisés et sur son soutien. Elle m'a accordé sa confiance et son écoute tant sur le plan intellectuel que personnel. Je suis heureuse qu'elle ait accepté de faire partie du jury de cette thèse. Qu'elle trouve ici exprimée ma profonde reconnaissance.

Lorsque Wanda Kaminski a accepté de diriger cette thèse, je me suis dit que mon travail serait entre de bonnes mains. Ces trois années m'ont montré à quel point j'avais raison. Grâce à sa disponibilité sans faille, à la qualité de son accompagnement intellectuel, au bien-fondé de ses "quelques suggestions", j'ai pu mener cette recherche dans des conditions optimales. Merci d'avoir cru en moi et de me l'avoir si bien montré.

Je remercie Monsieur Jean Gayon pour sa disponibilité et son enthousiasme. En acceptant de co-diriger cette thèse, il m'a permis d'aborder la partie historique de ce travail avec confiance. Je suis fière d'avoir pu profiter de sa rigueur et de la richesse de sa réflexion.

Merci à Martine Méheut et à Gérard Rebmann pour leur disponibilité et pour leurs conseils précieux. Cette thèse a profité très avantageusement de l'intérêt qu'ils lui ont porté. Merci également à Edith Saltiel pour ses encouragements bienveillants.

Les membres de l'équipe du LDSP ont suivi avec constance les grandes étapes de ce travail. Que chacun d'entre eux soit remercié pour son soutien et sa gentillesse.

Au début de ce travail, monsieur Gabriel Gohau m'a accordé une discussion des plus chaleureuses. Je tiens à lui exprimer ici ma plus vive reconnaissance.

Je remercie Sylvie ainsi que Marie-Hélène, ma mère, institutrices à l'école maternelle Louis Pasteur de Bailly qui ont permis à mes entretiens de se dérouler dans les meilleures conditions. Je remercie également Dany Launer d'avoir fait en sorte que je puisse profiter de la contribution essentielle des élèves du collège de Parmain. Merci à Philippe et à Marie-Thérèse, enseignants au collège de Parmain pour leur accueil chaleureux. Merci à tous les élèves cités dans cette thèse pour leur collaboration et leur spontanéité.

Grâce à l'accueil bienveillant de Nicole Séris, à sa cuisine inégalable, à notre complicité, mes semaines de rédaction à Montpellier furent des plus agréables et sans doute bien plus fructueuses qu'elles ne l'eurent été ailleurs. Merci.

Guilhem s'est investi avec rigueur et pertinence dans la relecture de ce travail. Qu'il reçoive ici le témoignage de mon amitié. Merci également à Claire pour son aide amicale.

Auprès de moi pendant ces trois années Delphine a vécu au rythme de mes doutes et de mes errances. Patiente, elle n'a eu de cesse d'encourager mon travail et d'accompagner ma réflexion. J'ai découvert grâce à elle un nombre incalculable d'expressions impliquant l'œil et la vision, Albert Cohen et Cyrano de Bergerac. Je ne saurais dire ce que cette thèse doit à sa présence à mes côtés. Pour tout cela, et pour le reste, merci. Je regrette de ne pas avoir pu rencontrer son père, le philosophe Jean-Pierre Séris, à qui je tiens à rendre hommage ici pour la profondeur de ces écrits.

J'étais persuadé que tout ce que je voyais se trouvait vraiment et réellement, en tout vrai mais en tout petit dans ma tête. Si j'étais au bord de la mer, j'étais sûr que cette Méditerranée que je voyais se trouvait aussi dans ma tête, pas l'image de la Méditerranée mais cette Méditerranée elle-même, minuscule et salée, dans ma tête, en miniature, mais vraie et avec tous ses poissons, mais tout petits, avec toutes ses vagues et un petit soleil brûlant, une vraie mer avec tous ses rochers et tous ses bateaux absolument complets dans ma tête, avec charbon et matelots vivants, chaque bateau avec le même capitaine du dehors, le même capitaine mais très nain et qu'on pourrait toucher si on avait les doigts assez fins et petits. J'étais sûr que dans ma tête, cirque du monde, il y avait la terre vraie avec ses forêts, tous les chevaux de la terre mais si petits, tous les rois en chair et en os, tous les morts, tout le ciel avec ses étoiles et même Dieu extrêmement mignon.

Albert Cohen, *Le Livre de ma mère*.

AVANT-PROPOS.....	8
INTRODUCTION	10
1. Eléments pour une compréhension du mécanisme de la vision	12
1.1. Généralités sur la perception sensorielle	12
1.2. Bases physiques de la sensation visuelle.....	13
1.2.1. Lumière et vision : le point de vue de l'optique géométrique	13
1.2.2. Eléments d'optique physique nécessaires à l'interprétation du mécanisme de la vision	17
1.3. Physiologie de la vision.....	18
1.4. Bases quantitatives de la vision	22
1.4.1. Eléments de photométrie énergétique.....	22
1.4.2. Photométrie visuelle	23
2. Le mécanisme de la vision : du savoir savant au savoir à enseigner	27
2.1. Proposition d'un modèle de la vision adapté pour l'enseignement.....	27
2.2. L'explication du mécanisme optique de la vision : quelques difficultés	29
2.3. Le mécanisme de la vision dans les programmes de sciences physiques du collège et de l'école élémentaire	31
3. Education scientifique et histoire des sciences : émergence d'une collaboration.....	33
3.1. Psychogenèse et histoire des sciences, comment penser autrement les lois récapitulacionnistes de Haeckel	34
3.2. Histoire des sciences et développement cognitif : le point de vue des psychologues	35
3.3. Histoire des sciences et développement cognitif : le point de vue philosophique.....	38
4. L'enseignement du mécanisme optique de la vision : Les réponses de l'histoire des sciences à des interrogations didactiques	40
4.1. L'attention portée aux raisonnements des élèves : l'histoire des sciences comme outil d'analyse ?	40
4.1.1. Des analogies en question.....	41

4.1.2.	Un nouveau statut pour l'erreur, une nouvelle image de la science.....	43
4.1.3.	L'analyse des difficultés du savoir à enseigner	46
4.2.	L'enseignement du mécanisme optique de la vision : l'histoire comme outil d'exposition.....	46
4.2.1.	Le rôle de la lumière dans la vision : une invention de l'esprit	47
4.2.2.	L'histoire des théories de la vision : une aide à la réalisation d'un « saut conceptuel »	49
5.	Plan	50

PREMIERE PARTIE : ANALYSE DE RAISONNEMENTS D'ELEVES A PROPOS DE LA VISION 53

1.	Introduction	53
2.	Les raisonnements des élèves à propos de la lumière et de la vision : résultats des recherches antérieures.....	55
3.	Analyse de raisonnements d'élèves de grande section de maternelle (1^{ère} année de cycle II)	58
3.1.	Présentation du guide d'entretien	60
3.2.	Analyse	63
3.2.1.	Le rôle des yeux : « je vois parce que j'ai des yeux »	63
3.2.2.	Le rôle des yeux : « je vois parce que mes yeux envoient quelque chose ».....	65
3.2.3.	Nature du « quelque chose » qui sort de l'œil : Voir c'est « toucher » ?.....	66
3.2.4.	Voir : des événements qui s'enchaînent dans le temps.....	67
3.2.5.	Le rôle des yeux : voir c'est recevoir « quelque chose » dans les yeux	71
3.2.6.	Le rôle de la lumière dans la vision : les objets ne renvoient pas de lumière sauf si... ..	72
3.2.7.	Le rôle de la lumière dans la vision : « Quand la lumière entre dans l'œil, ça pique les yeux »	76
3.2.8.	Pour conclure	80
4.	Analyse de raisonnements d'élèves de 4^e	81
4.1.	Présentation du questionnaire.....	83
4.2.	Analyse des réponses au questionnaire	85
5.	Les raisonnements des enfants et des élèves à propos de la vision : bilan	100

DEUXIEME PARTIE : UNE HISTOIRE DES THEORIES DE LA VISION 102

1.	L’histoire des théories de la vision : le choix d’une reconstruction rationnelle.....	103
1.1.	L’histoire sociale des sciences : un outil pour l’interdisciplinarité	104
1.2.	L’histoire rationnelle : un appui pour l’élaboration d’une séquence d’enseignement à composante historique	105
1.3.	Cadre méthodologique.....	107
2.	Une histoire des théories de la vision ou comment la lumière est devenue le <i>stimulus</i> de la vue	108
2.1.	La vision dans l’Antiquité	108
2.1.1.	L’optique de l’Antiquité, une science de la vision	109
2.1.2.	L’optique de l’Antiquité, naissance d’une discipline multidimensionnelle	112
2.1.3.	Des termes uniques et polysémiques	116
2.1.4.	La controverse du « sens » de la vue dans l’optique de l’Antiquité.....	122
2.2.	La controverse du « sens » de la vue, de l’optique antique à l’optique médiévale occidentale.	129
2.3.	Alhazen et les théories de la vision	134
2.3.1.	Alhazen, héritier de l’optique hellène.....	134
2.3.2.	La lumière comme <i>stimulus</i> de la vue : Alhazen et le règlement rationnel de la controverse du sens de la vue.....	138
2.4.	Léonard de Vinci et le mécanisme de la vision	146
2.5.	La vision dans la science classique occidentale	151
2.5.1.	Kepler et la formation de l’image rétinienne	151
2.5.2.	La théorie cartésienne de la vision.....	164
2.6.	En conclusion	175

TROISIEME PARTIE : L’ENSEIGNEMENT DU MECANISME OPTIQUE DE LA VISION, UN APPORT DE L’HISTOIRE DES SCIENCES 177

1.	Enseignement assisté par l’histoire des sciences : quels supports, pour quel enseignement ?	177
1.1.	Pour une approche socio-constructiviste	178
1.2.	Intérêt cognitif de l’utilisation d’une controverse scientifique.....	179
2.	Idées des élèves à propos de la vision et théories antiques de la vision : similitudes ?	181
2.1.	Analogies autour du « sens » de la vue	182

2.2.	Extramission, intromission : expliquer la vision sans l'aide d'une lumière <i>stimulus</i> de la vue	183
3.	La forme dialoguée et le débat d'idées : une expression pédagogique ancienne	185
4.	L'utilisation d'une controverse sous la forme dialoguée : un exemple en mécanique	188
5.	Evaluation de l'impact pédagogique et didactique d'un outil d'enseignement élaboré à partir de l'histoire des théories de la vision	190
5.1.	Présentation du <i>Dialogue sur les manières dont se fait la vision</i>	190
5.2.	Expérimentation autour du <i>Dialogue sur les manières dont s'effectue la vision</i>	201
5.2.1.	Présentation du scénario de l'entretien	202
5.2.2.	Analyse des entretiens	208
5.3.	Bilan : Les élèves et le <i>Dialogue sur les manières dont se fait la vision</i>	231
5.3.1.	La spécificité littéraire du texte	231
5.3.2.	La dimension cognitive et métacognitive	232
5.3.3.	La dimension transdisciplinaire	232
5.3.4.	La dimension historique : l'identification aux savants disparus	233
6.	Résultats	235
	CONCLUSION	239
	BIBLIOGRAPHIE	249
	TABLE DES FIGURES	259

ANNEXE 1 : Eléments historiques concernant la controverse autour de l'existence du vide.

ANNEXE 2 : L'utilisation d'une controverse sous la forme dialoguée, un exemple en mécanique.

Avant-propos

Le parti pris fondamental de la didactique des sciences est de s'intéresser à la relation maître-élève(s) sous l'angle du *savoir à enseigner*. La didactique des sciences se distingue donc d'autres types de recherche en éducation dans la mesure où elle se préoccupe essentiellement de savoirs scientifiques spécifiques et des rapports que l'enseignant et l'élève entretiennent avec eux (le premier étant tenu d'aider le second à se l'approprier). Or ces savoirs, présentés sous forme programmatique dans les Instructions Officielles sont issus de la recherche scientifique fondamentale. Les résultats de la recherche, ces *savoirs savants* (les concepts, les lois, les théories etc.), sont eux chargés d'une histoire, souvent longue et tumultueuse qui témoigne des progrès de la science mais également des difficultés rencontrées par les communautés de savants. Dès lors que le chercheur en didactique des sciences s'intéresse au savoir à enseigner, une part de son travail de recherche peut être dédiée à l'étude du savoir scientifique qui lui a donné naissance, et par conséquent à son histoire.

Notre recherche est essentiellement consacrée à l'enseignement du mécanisme optique de la vision, ou, pour être plus précise, à l'objectif de connaissance suivant : « pour voir un objet ordinaire, il est nécessaire que la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil de l'observateur ». Cette assertion n'est pas une évidence de *sens commun*¹. Elle sous-entend l'utilisation du phénomène de la *diffusion* (le renvoi de la lumière par les objets ordinairement éclairés) indissociable d'un concept construit de *lumière* (défini ici comme une entité invisible qui relie l'objet à l'œil), deux connaissances rationnelles qui risquent de se heurter aux idées plus empiriques que les élèves se font habituellement de la lumière et de la vision.

¹ Ce qui est appelé « sens commun » semble ne faire l'objet d'aucune définition consensuelle. Sa signification varie selon les époques et selon les différents courants d'idées (voir entre autres Aristote, Popper, Moore etc.). Aussi, nous pensons opportun d'en proposer une approche personnelle dans le champ restreint de la didactique. Notre définition s'inspirera des propos du sociologue Bernard Charlot, pour qui le sens commun est un ensemble des perceptions et de significations du monde partagé par plusieurs hommes (voir Charlot B. *Du rapport au savoir*, Anthropos, 1997), et surtout des idées développées par Laurence Viennot dans son ouvrage *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. Ainsi, pour nous, le sens commun est constitué d'un ensemble de représentations du monde d'origine extra-scolaire le plus souvent (mais pas toujours), partagées par le plus grand nombre, capables de générer des explications opérationnelles, mais non conformes à l'explication scientifique.

L'optique est un domaine qui a d'ores et déjà donné lieu à de nombreuses recherches en didactique dans le monde. Si la plupart d'entre elles sont consacrées à l'analyse de raisonnements d'élèves et d'étudiants (à propos du rôle de la lumière dans la vision, dans la formation des images optiques, à propos des couleurs etc.), certaines conduisent à des propositions d'enseignement dont l'influence sur les programmes scolaires français n'est pas à négliger. Malgré tout, de récentes études montrent que les difficultés rencontrées par les enfants ou par les élèves de collège perdurent jusqu'à l'université, et ce quels que soient les pays concernés.

L'enseignement de l'optique demeure donc perfectible, et il semble nécessaire d'explorer différentes voies pouvant contribuer à son amélioration. L'utilisation de l'histoire des sciences, si souvent revendiquée et le plus souvent présentée sous forme anecdotique comme un complément culturel à l'enseignement scientifique, devient une piste de réflexion didactique que nous entendons explorer. Notre objectif est donc de caractériser les éléments permettant de rendre l'utilisation de l'histoire des théories de la vision efficace du point de vue de la construction des connaissances en optique. En particulier, nous avons des raisons de penser qu'il est possible d'assister l'élève dans son apprentissage en lui proposant un cheminement de pensée qui intègre les découvertes conceptuelles jalonnant l'histoire des théories de la vision depuis Empédocle (5^e siècle avant JC) jusqu'à Descartes (17^e siècle). Dans cette perspective, l'histoire des sciences peut devenir un outil d'exposition de la science et servir de guide d'enseignement.

Notre travail de recherche se pose donc comme une contribution à l'enseignement de l'optique au collège et à l'école élémentaire. Nous chercherons, dans une dialectique entre investigation historique et investigation didactique, à élaborer un support d'enseignement qui favorise la compréhension du mécanisme de la vision. Nous montrerons également que les raisonnements des enfants, ces idées de la physique naïve (sans jugement de valeur aucun), peuvent également servir d'outil d'analyse de l'histoire des sciences.

INTRODUCTION

L'histoire des sciences peut-elle servir de support à l'élaboration d'un outil d'apprentissage performant ? Notre travail se pose comme un élément de réponse à cette question. Il s'inscrit dans un champ de réflexion qui a d'ores et déjà fait l'objet de nombreuses recherches. La philosophie et la psychologie se sont longtemps interrogées sur le bien-fondé des thèses récapitulationnistes selon lesquelles la phylogenèse résumerait l'ontogenèse. Ce thème a également inspiré certaines recherches en didactique des sciences, qui ont su poser les jalons d'une réflexion visant à faire de l'histoire des sciences un outil pour l'enseignement. Par ailleurs, la demande institutionnelle incite explicitement les enseignants de sciences à intégrer l'histoire des sciences à leur pratique². Dans un rapport commandé par le ministre Claude Allègre en 1999, le philosophe Dominique Lecourt propose une coopération effective des enseignants scientifiques et philosophes au lycée :

Rien n'apparaît plus souhaitable que de montrer aux élèves les perspectives et les enjeux des sciences qu'on leur enseigne. Les effets d'une telle incitation sur la culture des jeunes Français se révéleraient à long terme très profonds (...). L'esprit de la recherche viendrait vivifier l'esprit critique³.

Cependant, même si la littérature pédagogique et didactique foisonne de séquences d'enseignement à composante historique, leur impact didactique n'a que très peu été étudié. Grâce au regard que nous entendons porter sur les analyses philosophiques, psychologiques et sur les propositions didactiques antérieures, nous dégagerons les éléments susceptibles d'éclairer notre réflexion. Ce premier travail nous permettra d'élaborer un outil didactique à composante historique dont nous chercherons à évaluer les effets en situation d'apprentissage.

Dans cette introduction, nous exposerons les raisons qui justifient, selon nous, l'intérêt d'un rapprochement entre histoire des sciences et enseignement du mécanisme optique de la vision à l'école primaire et au collège. L'idée que l'histoire et l'enseignement des sciences puissent

² A titre d'exemple, il existe une rubrique intitulée « Histoire des sciences et des techniques » dans la partie « Considérations Générales » des *Documents d'Accompagnement des Programmes 2002 de Physique-Chimie de la classe de 3^e*, dans laquelle les enseignants sont invités à présenter aux élèves certains épisodes de l'histoire des sciences et des techniques en lien avec leur contexte social.

³ Dominique Lecourt, L'enseignement de la philosophie des sciences, *Rapport au ministre de l'Education nationale, de la Recherche et de la Technologie*, 1999.

s'éclairer l'une l'autre n'est pas nouvelle, aussi il conviendra d'interroger les recherches antérieures, et d'explicitier le cadre dans lequel s'inscrit notre recherche. Nous verrons quels éléments nous permettent de penser l'histoire des sciences comme un outil didactique d'exposition de la science en nous appuyant sur quelques exemples. Mais avant toute chose, il nous semble important de circonscrire notre champ d'application en précisant le contenu d'enseignement visé par notre séance, ainsi que le *savoir savant* dont il est issu.

1. Éléments pour une compréhension du mécanisme de la vision

L'explication du mécanisme de vision nécessite une approche plurielle où se trouvent entremêlés des phénomènes tant physiques que physio-psychiques. Dans un premier temps, nous reprendrons un modèle explicatif pluridisciplinaire du mécanisme de la vision. Nous nous intéresserons plus spécifiquement au rôle physique de la lumière, ainsi qu'à son interaction physiologique avec l'œil. Dans un second temps, nous adapterons ce modèle de façon à le rendre accessible aux possibilités cognitives des jeunes élèves. En outre, parce que notre recherche entend profiter à l'enseignement d'optique du primaire et du collège, il nous faudra tenir compte des exigences des programmes officiels de sciences physiques des classes concernées.

Le mécanisme de la vision s'inscrit dans le contexte plus général du fonctionnement des sens. Les fonctions sensorielles proprement dites sont celles qui, dans les rapports qui s'exercent du dehors au dedans, ont pour origine l'excitation des organes des sens, ou plus précisément des éléments récepteurs qu'ils contiennent.

1.1. Généralités sur la perception sensorielle

D'une manière générale, pour toute sensation, il faut entendre que le sens est la faculté apte à recevoir les formes sensibles sans la matière, de même que la cire reçoit l'empreinte de l'anneau sans le fer ni l'or. De même en est-il du sens correspondant à chaque sensible ; il pâtit sous l'action de l'objet coloré, sapide ou sonore, non pas en tant que chacun de ses objets est appelé telle chose particulière, mais en tant qu'il a telle qualité et en vertu de sa forme.

Aristote, *De l'âme*.

La perception sensorielle peut s'expliquer selon une succession d'évènements analogues d'un sens à l'autre : un élément cellulaire récepteur situé au niveau de l'organe sensoriel est excité par un *stimulus* extérieur spécifique ; cette excitation est à l'origine d'un message nerveux qui se propage par l'intermédiaire des neurones le long des nerfs sensitifs jusqu'au siège de la sensation, c'est-à-dire jusqu'à une aire (ou des aires) du cortex cérébral (puis, le traitement de l'information peut conduire à la participation d'autres régions du cerveau, celles liées notamment aux émotions etc.). Les éléments récepteurs sont, pour chaque organe des sens,

spécialisés dans la réception d'une excitation de nature déterminée. Autrement dit, chaque type d'élément récepteur a son excitant spécifique, son *stimulus* adéquat. Et pour ce qui est de la vue, la lumière est l'excitant spécifique des éléments qui constituent la rétine de l'œil, dits, pour cette raison, éléments photorécepteurs.

1.2. Bases physiques de la sensation visuelle

La compréhension du mécanisme physique de la vision nécessite que l'on s'intéresse d'une part au modèle optique de la formation de l'image rétinienne, d'autre part, à la nature de la lumière ainsi qu'à l'interaction lumière-matière.

1.2.1. Lumière et vision : le point de vue de l'optique géométrique

Si l'on adopte le point de vue de l'optique géométrique, on peut modéliser la propagation de la lumière dans un milieu homogène par une ligne droite appelée *rayon*. Ce rayon est une pure abstraction, il n'a donc aucune dimension, aucune propriété ni lumineuse, ni colorée. En outre, pour expliquer la vision d'un objet d'un point de vue géométrique, il est nécessaire de considérer un objet (lumineux par lui-même ou par diffusion), comme un ensemble constitué d'une infinité de points sans dimension. Chacun de ces points envoie de la lumière dans toutes les directions de l'espace. Lorsque la lumière rencontre un objet diffusant, elle est renvoyée dans toutes les directions, ce qui peut être représenté selon le modèle géométrique illustré par la Figure 1 :

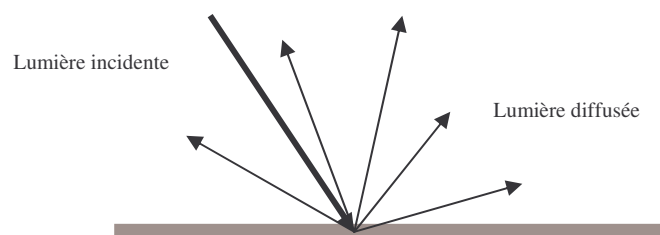


Figure 1 : Modèle géométrique de la diffusion. Un point de la surface de l'objet renvoie une partie de la lumière reçue dans toutes les directions.

Lorsqu'un observateur voit un objet, son œil reçoit, de la part de chacun des points de cet objet, un ensemble de rayons qui délimitent un pinceau ou *faisceau* divergent (Figure 2).

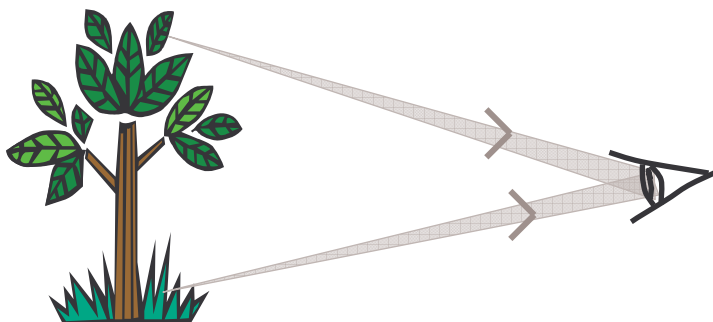


Figure 2 : Première approche du modèle géométrique de la vision. L'œil situé sur le trajet d'un pinceau divergent issu d'un point de l'objet peut localiser le point et accommoder en conséquence. En revanche, la localisation est impossible si le faisceau est remplacé par un rayon unique provenant de l'objet⁴. Sur ce dessin, la lumière incidente n'est pas représentée.

De plus, la direction de propagation de la lumière est modifiée lorsque celle-ci passe d'un milieu à un autre (de l'air à l'eau par exemple). On dit alors que la lumière est réfractée. Cette *réfraction* est fonction des caractéristiques des deux milieux traversés par la lumière. Les milieux dans lesquels la lumière subit une réfraction sont appelés milieux réfringents.

D'un point de vue physique, la vision s'explique par la formation de l'image d'un objet sur la rétine de l'œil (voir Figure 3). Cette image optique est une reconstitution point par point de l'objet ; elle est inversée par rapport à lui. A un point de l'objet correspond un point de l'image, par l'intermédiaire de deux pinceaux successivement divergent puis convergent comme le montre la Figure 4 ci-dessous.

⁴ Voir à ce sujet, Kaminski W. et Mistrioti G. Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente, *Bulletin de l'union des physiciens*, n°94, 2000, 757-784.

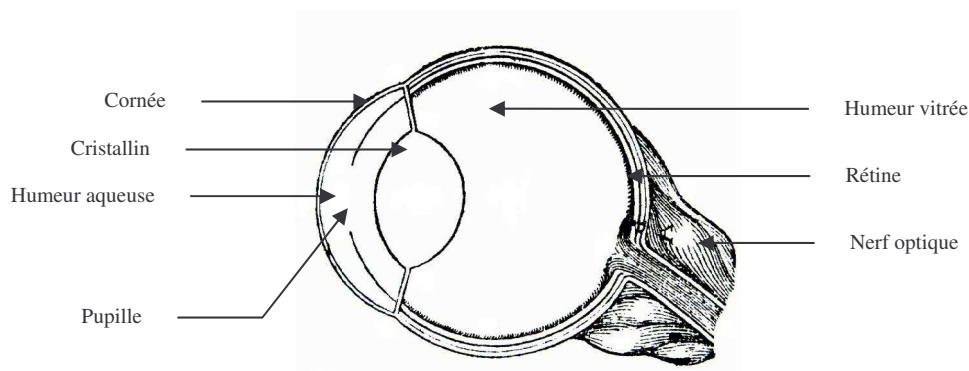


Figure 3 : Schéma de l'œil par René Descartes⁵.

La cornée est convexe vers l'avant, et son indice de réfraction est plus élevé que celui de l'air. L'indice de l'humeur aqueuse est sensiblement égale à celui de la cornée. Donc, l'ensemble cornée-humeur aqueuse forme un système optique réfringent dont l'indice de réfraction est environ égal à 1,33 (par rapport à l'air). Quant au cristallin, il peut être assimilé à un système optique biconvexe dont l'indice de réfraction est égale à 1,43. Par conséquent, lorsque les rayons de lumière pénètrent l'œil, tout se passe comme s'ils rencontraient deux systèmes optiques convergents. Ils sont tout d'abord déviés par le dioptré cornée-humeur aqueuse, puis par le cristallin et à nouveau par l'humeur vitrée. Ils terminent ensuite leur course sur la rétine. Pour simplifier la marche des rayons de lumière, on a calculé que l'ensemble du système optique de l'œil était équivalent, pour son action sur la réfraction globale, à un système convergent unique auquel on a donné le nom d'*œil réduit* (voir Figure 4).

La compréhension de la formation de l'image rétinienne nécessite de raisonner suivant une technique d'échantillonnage. Un rayon n'est pas un filet élémentaire de lumière émanant d'un tout petit trou éclairé, qui, aussi petit soit-il, n'est pas davantage un point lumineux :

En fait, le passage d'une très petite surface à un point sans dimension peut se faire seulement par la pensée, en supposant que le trou peut être réduit indéfiniment. (...) Cette hypothèse dépasse effectivement l'expérience et commence déjà à substituer aux faits que nous pouvons percevoir, une notion théorique que nous construisons intellectuellement⁶.

⁵ Descartes R. *Dioptrique* (1638), Fayard, Paris, réed. 1987, p. 94.

⁶ Halbwachs F. *La pensée physique chez l'enfant et le savant*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1974, 53-54.

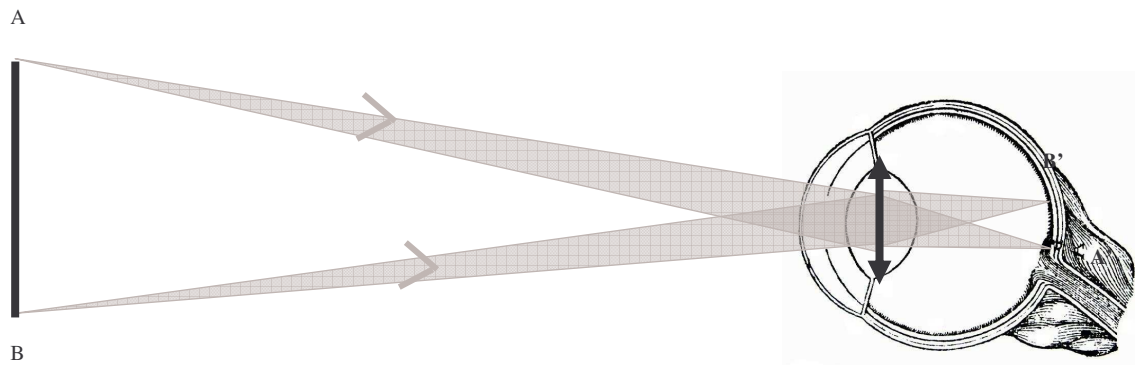


Figure 4 : Schématisation de la formation de l'image rétinienne. A un point A de l'objet correspond un point-image A' sur la rétine par l'intermédiaire de faisceaux divergents puis convergents. Ici il s'agit d'une représentation de l'œil réduit où le système optique de l'œil est remplacé par une lentille convergente. (Dessin de l'œil d'après Descartes). La double flèche remplace le système convergent équivalent à l'ensemble cornée + cristallin.

Les outils conceptuels utilisés (rayon, points...) sont loin d'être de sens commun ; ils ne possèdent, en outre, aucune existence matérielle. On peut donc s'attendre à ce que la pensée naïve résiste à la mise en oeuvre de raisonnements manipulant ces outils. Pourtant, ainsi que le souligne Halbwachs, l'optique géométrique fait preuve d'une grande efficacité.

Cependant, l'optique géométrique existe. Elle a été développée avec une rigueur et une efficacité admirable dans un modèle opérant sur des rayons conçus comme des lignes sans dimension. Nous nous apercevons que l'on peut raisonner sur une théorie axiomatisée⁷.

Cette modélisation géométrique de la vision ne permet d'expliquer ni la sensation visuelle ni son interprétation qui font intervenir des phénomènes à la fois physiologiques et psychiques. Ceux-ci dépendent d'abord de l'action de la lumière sur la rétine, action qui s'inscrit dans le contexte général de l'interaction de la lumière et de la matière.

⁷ Ibid. p. 55.

1.2.2. Éléments d'optique physique nécessaires à l'interprétation du mécanisme de la vision

Et alors, les physiciens se sont trouvés bien embarrassés parce que, d'un côté, il y a l'ensemble des phénomènes d'interférence et de diffraction qui montrent que la lumière est formée d'ondes et, de l'autre côté, il y a le phénomène photoélectrique et d'autres phénomènes plus récemment découverts qui montrent que la lumière est formée de corpuscules, de *photons*, comme on dit à présent.

Louis de Broglie, 1937.

L'action de la lumière sur la rétine peut s'expliquer si l'on adopte, pour la lumière, le modèle quantique du photon tel qu'il fut défini par Einstein en 1905 : la lumière est constituée de particules énergétiques appelées plus tard *photons*. Ces particules « transportent » une certaine quantité d'énergie sous forme de radiations électromagnétiques⁸. L'énergie transportée dépend de la fréquence de la radiation électromagnétique selon la formule $E=h\nu$, où E est l'énergie du photon, h une constante (constante de Planck) et ν la fréquence du rayonnement. Rappelons que cette fréquence est liée à la longueur de l'onde λ . La lumière transporte donc une énergie qu'il est possible de mesurer, et qui, si l'on adopte le modèle du photon, se propage par « paquets », de façon discontinue.

En référence à la vision, on définit la *lumière visible* (ou lumière blanche) comme l'ensemble des radiations électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,38 et 0,7 microns⁹. La lumière blanche est donc polychromatique : elle est constituée de radiations de longueurs d'onde différentes. A chacune de ces longueurs d'onde correspond une couleur. Les radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,38 et 0,7 microns sont les seules auxquelles l'œil est sensible, et donc les seules auxquelles nous nous intéresserons. Par souci de clarté, la lumière dont nous parlerons dès à présent sera la lumière visible.

⁸ A ce sujet, Louis de Broglie écrit ceci : « M. Einstein s'est aperçu qu'il fallait revenir à une structure corpusculaire des radiations. Il a admis que les radiations sont formées de corpuscules transportant une énergie inversement proportionnelle à la longueur d'onde et a montré que les lois de l'effet photo-électrique se déduisent facilement de cette hypothèse ». Voir de Broglie L. *Matière et lumière*, Albin Michel, 1937, p. 25.

⁹ Selon les sources auxquelles on se réfère, on trouve des valeurs voisines telles que 0,4 et 0,8 μm .

La lumière peut être émise soit par des sources primaires de lumière, soit par des sources secondaires. Les sources primaires produisent et émettent leur propre lumière¹⁰, tandis que les sources secondaires renvoient une partie de la lumière qu'elles reçoivent. Ce phénomène est appelé *diffusion*, il obéit au principe d'interaction entre la lumière et la matière : en fonction des propriétés physico-chimiques de la surface des objets et de la nature même de la matière rencontrée, l'énergie et la composition spectrale de la lumière incidente seront différentes de celles de la lumière diffusée par l'objet¹¹.

Pour comprendre le mécanisme de la vision, il est donc nécessaire de tenir compte du nombre de photons ainsi que de l'énergie transportée par chaque photon, qui sont les deux éléments auxquels l'œil est sensible.

1.3. Physiologie de la vision¹²

La rétine est constituée de cellules nerveuses interconnectées. On en compte plusieurs sortes différentes, et parmi elles, deux sont des photorécepteurs : ce sont les cônes et les bâtonnets (voir Figure 5).

Sous l'action d'un photon chaque photorécepteur émet un signal nerveux, et le transmet aux cellules bipolaires. A leur tour, les cellules bipolaires transmettent ce signal aux cellules ganglionnaires, et ainsi jusqu'au cortex cérébral. En fait, les segments externes des photorécepteurs contiennent une couche de pigments visuels appelée *chromophore*, constitués de molécules de rhodopsine.

¹⁰ La lumière des sources primaires est produite suite à une transformation d'énergie. Dans la plupart des cas, l'émission de lumière est le résultat de l'agitation thermique des électrons présents dans la matière. L'énergie cinétique microscopique est alors transformée en énergie lumineuse. Il existe également des sources dans lesquelles la lumière est produite par émission quantique, c'est-à-dire qu'elle correspond à l'énergie émise suite aux transitions électroniques entre différents niveaux d'énergie des atomes (c'est le cas notamment de la lumière produite par les tubes fluorescents).

¹¹ D'après le modèle actuel, la diffusion obéit à des règles d'interaction entre les photons de la lumière incidente et les électrons de la matière éclairée (voir Feynman R. *Lumière et matière, une étrange histoire* (1985), trad. F. Balibar et A. Laverne, Point Sciences, Paris, 1987, 136-139).

¹² Pour une description détaillée du mécanisme de la vision on pourra se référer à l'ouvrage de Robert Rodieck, *La vision* (1998), trad. F. Koenig-Supiot et O. Thoumine, De Boeck, rééd. 2003.

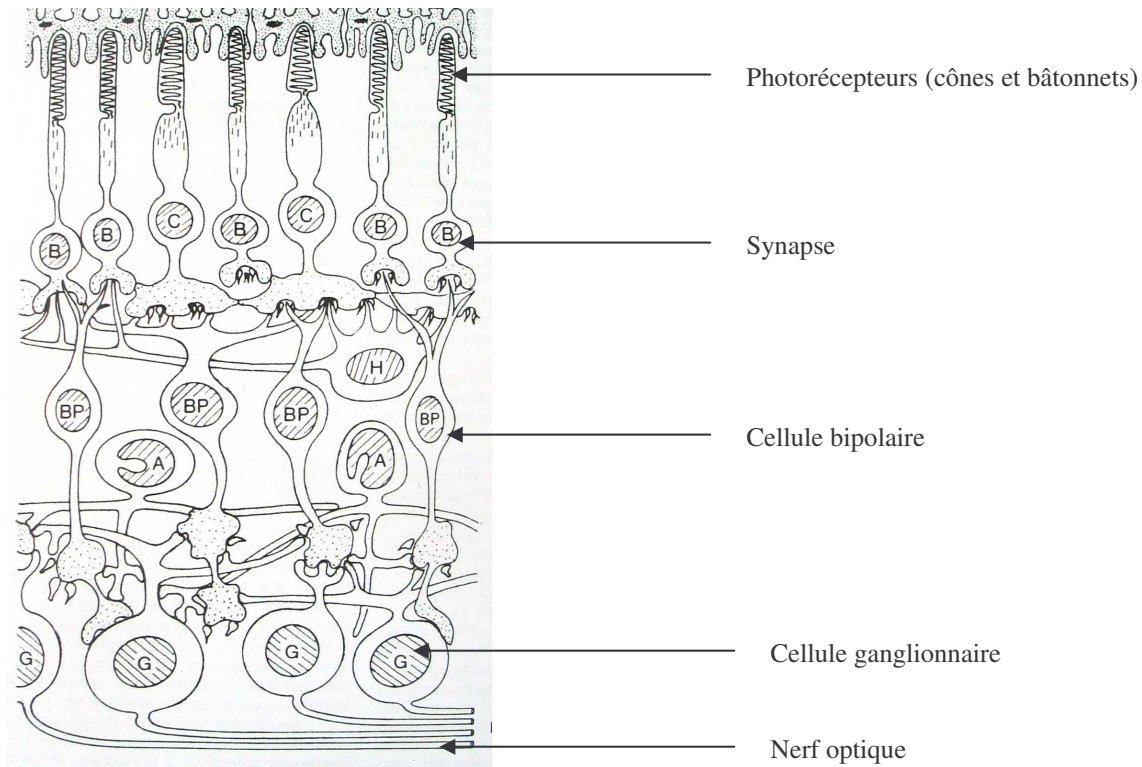


Figure 5 : Structure de la rétine. (Source : Rodieck, 1998)

L'absorption d'un photon par la chromophore modifie la conformation de la molécule de rhodopsine : elle passe alors d'une forme *cis* à une forme *trans*. En d'autres termes, l'absorption d'un photon par la chromophore entraîne la transformation de la molécule de rhodopsine en une forme activée. Cette photoactivation amorce une cascade de réactions biochimiques à l'intérieur même du photorécepteur, qui, au bout du compte, donne naissance au signal électrique en réponse à l'action de la lumière (voir Figure 6).

Tous les photorécepteurs de la rétine fonctionnent sur un principe identique lorsqu'ils sont activés. Or cette activation n'est pas systématique. D'abord, la lumière, pour être perçue, doit avoir une intensité suffisante, c'est-à-dire que la quantité de photons qui active la rétine doit être suffisante pour provoquer la sensation visuelle. Inversement, si la quantité de photons est trop importante alors les activations seront trop nombreuses : c'est l'éblouissement et la rétine risque d'être endommagée. Afin de limiter la quantité de photons lorsque celle-ci est trop importante, la pupille de l'œil se réduit.

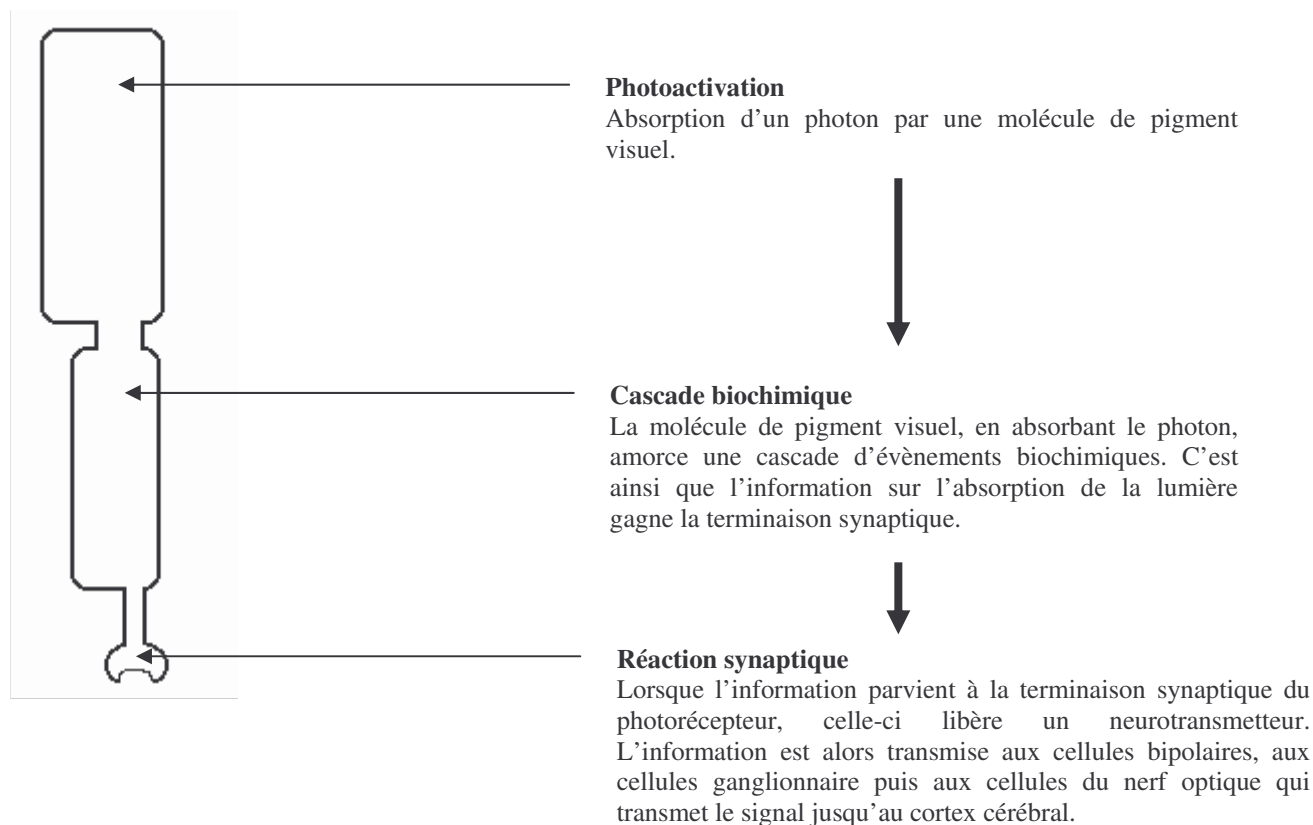


Figure 6 : Schéma général du fonctionnement d'un photorécepteur. Ce schéma est volontairement simplifié par nous-même¹³.

En outre, tous les photorécepteurs ne sont pas activés par tous les photons qui les atteignent. Il existe en fait trois types de cônes (cônes L, M et S) qui se distinguent par la partie du spectre lumineux à laquelle ils sont le plus sensibles¹⁴. Dans le spectre visible, les cônes L sont plus sensibles aux basses fréquences (lumière rouge), les cônes M aux moyennes fréquences (lumière verte), et les cônes S, aux fréquences les plus élevées (lumière bleue). Par conséquent, en fonction des types de cônes qui sont activés et de l'intensité avec laquelle ils le sont, l'aire spécifique de la vision du cortex cérébral interprète le signal qu'elle reçoit de la

¹³ En réalité, la terminaison synaptique du photorécepteur libère continuellement un agent particulier (le glutamate) vers la cellule bipolaire. Lorsque le pigment visuel est activé par un photon, le taux de libération du glutamate diminue, entraînant ainsi la création du signal nerveux.

¹⁴ En anglais, Low, Middle et Supra frequencies, ou bien Long, Middle et Short wavelenght. De façon simplifiée, Françoise Chauvet propose un découpage du spectre de la lumière blanche en trois bandes qui correspondent aux couleurs rouge (pour les grandes longueurs d'onde), vert (pour les longueurs d'onde moyennes) et bleu (pour les longueurs d'onde courtes). Voir à ce sujet, Chauvet F. *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principe d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*, thèse, Université Paris 7, 1994, introduction.

part des cônes sous la forme d'une couleur, d'une forme, d'un mouvement, d'une luminosité...¹⁵. Ces perceptions sont à l'origine des informations qui nous permettent de connaître le monde qui nous entoure. Quant aux bâtonnets, ils réagissent avec tous les photons du spectre visible, et sont capables de transmettre des variations d'intensité lumineuse dans des conditions d'obscurité, alors qu'ils demeurent inactifs en pleine lumière. Ce sont donc des détecteurs de lumière de très grande sensibilité mais incapables de donner au cerveau l'information concernant la fréquence du photon absorbé et donc aucune information précise sur la couleur de l'objet dont est issu ledit photon. La couleur est donc une interprétation du cerveau, ou plus précisément une réponse du cerveau à un degré de stimulation des différents types de cônes par des photons dont la fréquence correspond à la sensibilité des cônes L, M et S (α_L , β_M , γ_S).

En résumé, l'œil est un récepteur photoélectrique de lumière : l'excitation des cellules photoréceptrices de la rétine par les photons entraîne une série de réactions biochimiques complexes qui aboutissent finalement à la création d'un signal nerveux qui chemine jusqu'au cortex visuel par les nerfs optiques. La vision dépend d'une part du taux d'activation des photorécepteurs, et d'autre part du type de photorécepteurs qui sont activés. Et il existe bien évidemment un lien entre le taux d'activation des photorécepteurs et la quantité de lumière qui pénètre l'œil, quantité à laquelle nous nous intéresserons plus bas. Ajoutons pour finir que ce que nous voyons dépend bien entendu de la direction vers laquelle les yeux, c'est-à-dire le regard, sont orientés ; direction qui détermine la portion de l'espace visible : *le champ visuel*.

Il est intéressant de signaler qu'à l'origine la mesure de la lumière reposait sur l'analyse qualitative de ses effets psychophysiques, c'est-à-dire uniquement sur des considérations liées à la perception visuelle¹⁶. Ce n'est que plus tard que les grandeurs permettant de mesurer la lumière se sont écartées de la vision, devenant ainsi objectives et spécifiquement physiques.

¹⁵ Nous tenons à rappeler ici que les signaux nerveux sont identiques quel que soit le sens concerné. En revanche, le cortex cérébral est lui divisé en aires sensorielles distinctes. Chaque aire sensorielle interprète spécifiquement le signal nerveux qu'elle reçoit en termes de perception visuelle, auditive, tactile etc. Autrement dit, la différenciation sensorielle s'opère au niveau du cortex.

¹⁶ A la fin du 19^e siècle, une bougie était utilisée comme référence pour quantifier la luminosité. Le détecteur de luminosité était l'œil.

1.4. Bases quantitatives de la vision

1.4.1. Éléments de photométrie énergétique

Indépendamment de son rôle dans le mécanisme de la vision, la lumière est une entité mesurable. La photométrie énergétique permet en effet de déterminer des grandeurs telles que la *quantité de lumière*, le *flux énergétique*, l'*intensité énergétique*, l'*éclairement* et la *luminance*, sans qu'aucune de ces grandeurs n'évoque d'effet visuel¹⁷. Dans ce cas, la lumière est une entité proprement physique dont la mesure est donnée par des instruments équipés de cellules photoélectriques reliées à un milliampèremètre. Et en principe, les valeurs obtenues ne varient pas d'un instrument à l'autre, contrairement aux valeurs obtenues lors d'une stimulation visuelle.

Si l'on considère une surface éclairée comme un ensemble de points, on peut admettre que chacun de ces points envoie une certaine quantité de photons, autrement dit une certaine *énergie* mesurée en Joules. Le *flux énergétique* est le nombre de photons émis par ce point en une seconde ; il peut s'exprimer en Watt ou en photon/s¹⁸. L'*éclairement* désigne la densité de flux, c'est-à-dire le flux de photons par unité d'aire qui vient frapper une surface. L'unité de mesure de l'éclairement est le Watt/m² ou photons/s/m². A partir d'un point, on peut considérer les photons répartis à l'intérieur d'un cône d'angle solide Ω . L'*intensité énergétique* est une grandeur qui décrit le nombre de photons à l'intérieur de ce cône. Plus précisément, elle désigne le flux par unité d'angle solide en W/sr ou en photon/s/sr (le stéradian sr est l'unité de mesure d'un angle solide). La *luminance*, enfin, est le quotient de l'intensité énergétique par l'aire projetée perpendiculairement à la direction du flux ; on l'exprime en Watt/sr/m² ou encore en photon/s/sr/m² (voir Figure 7).

¹⁷ La photométrie s'intéresse exclusivement aux radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nm, c'est-à-dire aux radiations du spectre visible. Pour toutes les autres longueurs d'onde, on utilise des grandeurs radiométriques.

¹⁸ Nous reprenons un fois encore le vocabulaire utilisé par R.W. Rodieck dans son ouvrage *La vision*, op. cit. Signalons toutefois qu'à la suite de Rodieck, nous utilisons ici le terme « point » dans un sens distinct du « point » mathématique en tant qu'objet sans dimension. Le « point » dont il est question ici émet des photons, il s'agit donc d'un élément infinitésimal de surface.

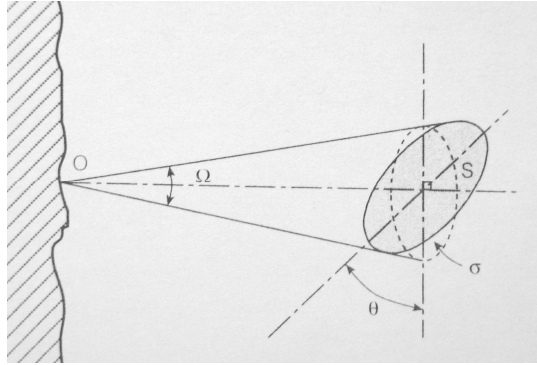


Figure 7 : Représentation géométrique de l'intensité énergétique et de la luminance. O est le point d'émission des photons, Ω désigne l'angle solide du cône d'émission, S, la surface traversée par le flux énergétique, et σ la surface perpendiculaire à l'axe d'émission traversée par le même flux que la surface S. (Source : Rodieck, 1998).

Les grandeurs photométriques telles que nous les avons définies sont envisagées uniquement dans le cas de lumières monochromatiques. Elles ne rendent pas compte de la distribution spectrale des photons. Or, si l'on tient compte de cette distribution, il est nécessaire de ramener ces grandeurs à un intervalle de fréquence mesuré en Hertz. On obtient alors des grandeurs qui rendent compte à la fois de la quantité de photons et de la composition spectrale de la lumière émise. Les grandeurs sont donc calculées pour chaque fréquence. A titre d'exemple, l'intensité énergétique est alors exprimée en $\text{photon/s/m}^2/\text{Hz}$.

1.4.2. Photométrie visuelle

L'œil est un instrument de détection de lumière particulier en ce sens que les réponses des observateurs aux stimulations visuelles dépendent de chaque observateur. Malgré tout, la photométrie actuelle permet de mettre en relation les grandeurs photométriques physiques présentées ci-dessus avec des grandeurs photométriques visuelles. En réalité, il s'agit des mêmes grandeurs, mais elles sont pondérées par une fonction de transfert déterminée par la faculté d'un *observateur moyen* (choisi comme observateur de référence et défini de façon conventionnelle) à percevoir telle ou telle radiation. Ainsi, le passage des grandeurs énergétiques aux grandeurs visuelles dépend de l'interprétation sensorielle de l'observateur moyen, interprétation que l'on trouve quantifiée par les courbes de sensibilité spectrale $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ représentées par la Figure 8.

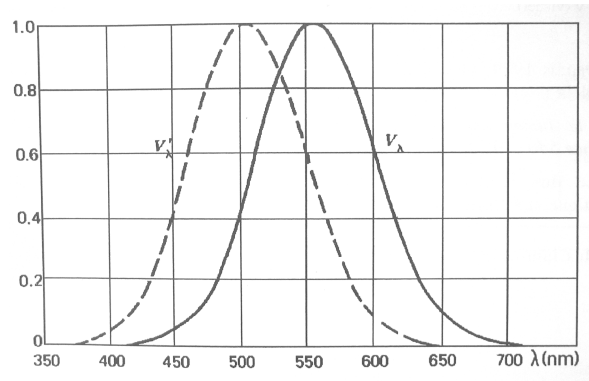


Figure 8 : Courbe de sensibilité spectrale appelée également courbe de visibilité de l'œil ou encore courbe d'efficacité lumineuse (source : Ronchi, 1966). Elle représente la réponse d'un œil moyen aux radiations de diverses longueurs d'onde. La courbe en trait plein correspond à la vision de jour (vision photopique), celle en tirets à la vision de nuit (vision scotopique). Cette courbe est construite pour un observateur moyen sur un champ de vision centrale de 10° . Ce diagramme a été adopté par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.), par convention internationale en 1964 et permet la définition d'un observateur de référence.

Toutes les grandeurs de photométrie visuelle sont donc relatives à un observateur de référence dont la sensibilité spectrale est donnée par la courbe de la Figure 8. Elles intègrent l'aspect psychophysique de la lumière, à mi-chemin entre l'aspect physique et l'aspect psychosensoriel. Le tableau ci-dessous présente une synthèse des grandeurs de photométrie visuelle (voir Tableau 1). Ajoutons que la *luminosité* est l'équivalent psychosensoriel de la luminance lumineuse. En effet, la luminance provient d'une définition et d'un observateur de référence, alors que la luminosité est propre à chacun. De même en est-il de la *saturation* et de la *teinte* qui sont des grandeurs dépendantes de l'interprétation psychique de l'observateur et qui sont respectivement liées à la pureté et à la longueur d'onde (dans le vide) de la lumière perçue.

Grandeur photométrique visuelle	Unité	Définition
Flux lumineux ϕ_v	Lumen lm	1 lumen est un flux de $4,09 \times 10^{15}$ photons/s émis à une fréquence de 540 TeraHertz.
Intensité lumineuse I_v	Candela cd	Flux lumineux par unité d'angle solide (lumen/sr).
Eclairement lumineux E_v	Lux	Flux lumineux par unité de surface. 1 lux = 1 lumen/m ² .
Luminance lumineuse L_v	Candela/m ²	Grandeur photométrique de l'effet visuel créé par le flux lumineux. Elle caractérise la quantité de lumière visible qui atteint l'œil à partir d'une petite partie de l'objet.
Eclairement rétinien	Troland td	Intensité lumineuse de l'image rétinienne. Produit de la luminance de la source par l'aire de la pupille. 1 tr = 1cd/m ² × 1mm ²

Tableau 1 : Description des grandeurs visuelles

Le fondement de la photométrie visuelle est de comparer et de classer, sur une échelle subjective, la luminosité de différentes sources de rayonnement. Son objectif est de définir une grandeur (la luminance) qui reflète une propriété physiologique du système visuel par rapport à des rayonnements chromatiquement différents. En d'autres termes, elle vise à évaluer l'efficacité, en termes physiologiques, des photons issus d'une source lumineuse à chaque fréquence. Il existe deux formes de photométrie visuelle, scotopique et photopique. La photométrie scotopique s'intéresse à la mesure de la perception qui résulte de l'activation des bâtonnets, suivant la sensibilité spectrale du pigment visuel qu'ils contiennent. La photométrie photopique est basée sur un principe identique, simplement, elle s'intéresse à l'activation des cônes et combine donc les sensibilités spectrales des trois types de cônes L, M et S. L'œil est sensible à des valeurs de luminance allant de 10^{-6} (seuil de sensibilité des bâtonnets) à un peu moins de 10^5 cd/m² (Cette valeur, qui est celle par exemple de la luminance de la neige au Soleil, correspond également à la saturation des cônes). La luminance du ciel bleu est d'environ 10^3 cd/m² (valeur de saturation des bâtonnets), celle du Soleil de 10^9 cd/m². Bien entendu, le diamètre de la pupille de l'œil varie en fonction de la luminance (voir Figure 9).

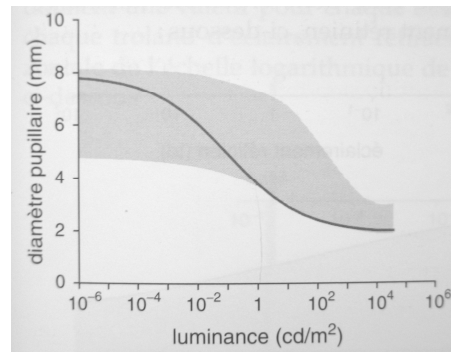


Figure 9 : Courbe d'estimation du diamètre pupillaire moyen (en mm) en fonction de la luminance moyenne (en cd/m^2). La région gris clair montre les variations individuelles enregistrées chez douze sujets. (source : Rodieck, 1998)

Lorsque nous voyons un objet, une partie de la lumière diffusée par cet objet pénètre dans l'œil et forme une image sur la rétine dont l'intensité lumineuse conditionne le taux d'activation des photorécepteurs, et donc la vision. La grandeur qui mesure l'intensité lumineuse de l'image rétinienne est appelée *éclairage rétinien*, mesuré en troland (td). Il correspond au taux de capture des photons par les photorécepteurs, et dépend de la luminance de l'objet et de la surface de la pupille. Dès lors, l'éclairage rétinien ne dépend pas de la distance entre l'œil et l'objet perçu¹⁹. Nous admettons qu'à un point de l'image rétinienne correspond un éclairage particulier, et donc une luminance définie à partir de l'intensité lumineuse issue du point-objet correspondant. Dans cette hypothèse, un point image renseigne donc l'observateur sur la composition spectrale de la lumière issue du point objet correspondant, ainsi que sur la quantité de cette lumière. La réponse perceptive du cortex cérébral à la stimulation de chaque point de l'image rétinienne se traduit en termes de teinte, de saturation et de luminosité. L'ensemble de ces réponses correspond à la vision des formes colorées en mouvement, à la reconnaissance des visages...

¹⁹ Pour un troland d'éclairage, un bâtonnet capture 4,6 photons par seconde et un cône, 17,5 photons/s (la surface de la pupille est alors environ égale à 10mm^2). Un bâtonnet est activé à partir de 10^{-4} photons/s et saturé lorsque le taux de capture atteint 20000 photons/s. Un cône est activé à partir de 3 photons/s et saturé à partir de 10^6 photons/s¹⁹. Rappelons que ces valeurs correspondent au maximum de sensibilité spectrale, c'est-à-dire à des photons de fréquence égale à 540 THz.

2. Le mécanisme de la vision : du savoir savant au savoir à enseigner

Il nous faut à présent proposer une explication du mécanisme de la vision utilisable dans le cadre du cours de sciences physiques du cycle III de l'école élémentaire et de la classe de 4^e du collège.

2.1. Proposition d'un modèle de la vision adapté pour l'enseignement

De la partie qui précède nous pouvons retenir que la vision est le résultat d'une interprétation cérébrale de l'action de la lumière sur la rétine de l'œil. La Figure 10 donne un aperçu schématique du mécanisme de la vision, dans les limites de ce qui peut être enseigné aux élèves de primaire et de collège.

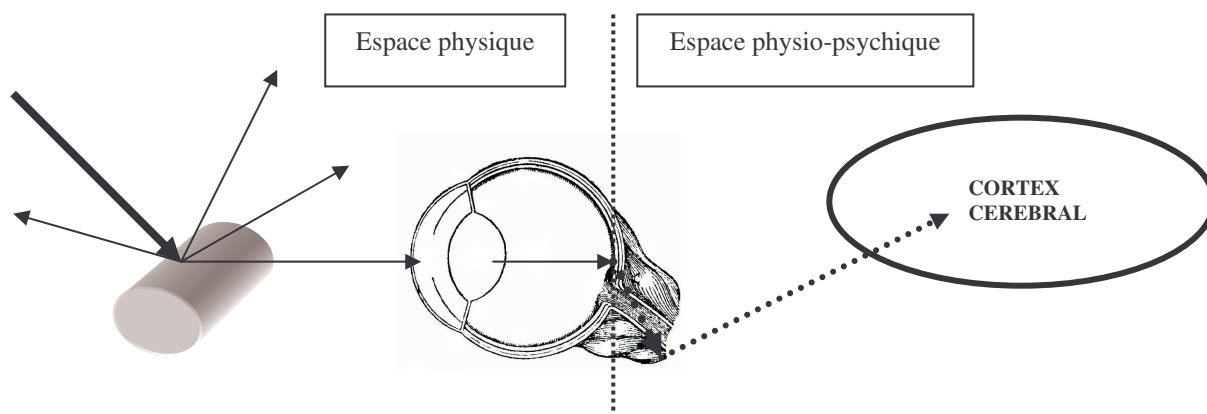


Figure 10 : Représentation schématique simplifiée du mécanisme de la vision. Le trait en pointillé permet de distinguer l'espace proprement physique de l'espace physio-psychique. En outre, les flèches en traits pleins représentent la lumière (incidente et diffusée), tandis que les flèches en pointillés figurent la propagation du signal nerveux à l'intérieur du système visuel²⁰.

²⁰ Cette représentation est proposée par Françoise Chauvet, et fondée sur l'idée de « chaîne » qu'elle développe. Voir Chauvet F. op. cit. p. 62.

Ce mécanisme intègre une dimension physique et une dimension physio-psychique. Or nous faisons le choix de circonscrire notre proposition d'enseignement à l'espace physique en nous intéressant à la dimension proprement physique du mécanisme. Dans cet espace, l'objectif de connaissance que nous nous fixons est le suivant :

Pour voir un objet, il est nécessaire que l'œil reçoive de la part de cet objet de la lumière. Un homme peut voir lorsque la quantité de lumière qui pénètre son œil n'est ni trop forte, ni trop faible.

Une telle assertion sous-tend le phénomène de diffusion, phénomène que nous exprimerons en ces termes :

Les objets ordinaires et ordinairement éclairés renvoient une partie de la lumière qu'ils reçoivent.

Lorsque la lumière rencontre un objet ordinaire, elle est renvoyée par la surface de cet objet après avoir été modifiée. La lumière ainsi modifiée « transporte » vers l'œil les informations nécessaires à l'identification de l'objet (sa forme, sa couleur, la distance qui le sépare de l'observateur, etc.). Du point de vue de la formation de l'image rétinienne, nous pouvons considérer la lumière comme élément constitutif d'une chaîne. Celle-ci forme une trame de raisonnement, que nous pouvons restituer sous la forme suivante (voir Figure 11) :



Figure 11 : Modèle simplifié du mécanisme optique de la vision, présenté sous la forme d'une chaîne.

Cette chaîne implique un suivi temporel d'évènements conforme aux tendances de raisonnement dictées par le sens commun qui peine à admettre la simultanéité :

Penser la simultanéité n'est guère naturel. L'analyse des situations d'évolution de systèmes prend très souvent la structure d'une histoire. Ce terme renvoie à la mise en œuvre d'une

succession temporelle d'évènements. Au 'en même temps' de l'analyse quasi-statique, le raisonnement commun préfère le 'plus tard', éventuellement le 'plus loin' du conteur²¹.

Ce mode de raisonnement de nature séquentielle²², s'il est préjudiciable dans la plupart des situations physiques impliquant plusieurs grandeurs agissant simultanément, ne présente ici aucun inconvénient. Dans le cas de la vision, il est possible d'étudier la lumière isolément, et par conséquent, d'accepter qu'elle soit l'acteur exclusif d'un raisonnement temporel linéaire. Aussi, la chaîne que nous présentions précédemment possède-t-elle au moins l'avantage d'entrer en résonance avec un type de raisonnement spontané identifié par les chercheurs en didactique.

En outre, nous définirons la lumière par quelques-unes de ses propriétés : elle est le médiateur auquel l'œil est sensible, elle est invisible de profil, et enfin, elle est quantifiable, c'est-à-dire que c'est un objet dont on peut parler en termes de « **plus ou moins** ». A aucun moment de notre recherche, nous ne chercherons à expliciter sa nature.

2.2. L'explication du mécanisme optique de la vision : quelques difficultés

Pour la plupart des élèves, l'entrée de la lumière dans l'œil n'est admise qu'au prix de la gêne qu'elle provoque²³. En d'autres termes, la sensation d'éblouissement semble constituer la seule situation au cours de laquelle les élèves reconnaissent que la lumière pénètre leurs yeux. Dès lors, il devient difficile pour eux de comprendre que la vision est le résultat de l'entrée de la lumière dans l'œil, puisque la vision ne s'accompagne en général d'aucune sensation douloureuse. De plus, rares sont les élèves qui reconnaissent que les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent. En général, la lumière est identifiée aux sources

²¹ Viennot L. *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, op. cit. p. 108.

²² Voir Closset J.L. *Le raisonnement séquentiel en électricité*, thèse, Université Paris 7, 1983 ainsi que Rozier S. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*, thèse, Université Paris 7, 1988.

²³ Pour une étude approfondie des raisonnements des enfants à propos de la lumière, on pourra se référer aux travaux d'Edith Guesne. Voir en particulier, Guesne E. Les conceptions des enfants sur la lumière, *New trends in physics teaching*, vol.4, UNESCO, 1984. La première partie de notre travail sera exclusivement consacrée aux raisonnements des élèves à propos de la vision.

primaires dont elle est issue, ou à la zone d'éclairement parfois visible à la surface de l'objet et non à l'entité invisible qui se propage à partir des objets ordinairement éclairés.

Le phénomène de la diffusion et l'entrée de la lumière dans l'œil constituent pourtant les principes fondateurs du modèle de la vision que nous venons de présenter. Nous pouvons donc nous attendre à ce que l'acquisition d'un tel modèle soit très difficile pour les élèves, et il paraît nécessaire que les programmes scolaires prennent la mesure de ces difficultés.

Le caractère polysémique du terme « lumière » contribue également à rendre la compréhension du mécanisme optique de la vision délicate. Dans son acception commune, la « lumière » peut désigner les sources lumineuses elles-mêmes, les impacts visibles sur certaines surfaces éclairés (on parle alors de « lumière qui se voit »). De même, le mot « lumière » est-il parfois utilisé pour nommer la clarté du jour. En outre, il conviendrait d'ajouter à toutes ces significations, celles plus théologiques et philosophiques, qui renvoient de façon figurée le terme « lumière » à Dieu ou à la Vérité divine (comme chez Saint Augustin), ou encore à l'entendement humain (comme chez Rousseau). Du point de vue de l'optique, le terme *lumière* désigne une entité invisible, médiateur entre l'objet vu et l'œil qui regarde. Par conséquent, le terme « lumière », tel qu'il est utilisé dans la langue française, n'a pas la même signification selon qu'il s'inscrit dans le contexte de la vie courante ou dans celui, plus spécifique, de la physique. En d'autres termes, la « lumière » du sens commun n'est pas la *lumière* du physicien²⁴. Mais notre langue est ainsi faite que nous sommes contraints d'utiliser ce même terme pour désigner des choses pourtant très différentes²⁵. Une

²⁴ Le dictionnaire *Le Petit Robert* rappelle que le mot « lumière » désigne « l'agent capable d'impressionner l'œil, de rendre les choses visibles », mais également « la clarté », « le jour », « les sources d'éclairage », « l'éclairage » lui-même. *Le Petit Robert*, 2004.

²⁵ Afin de lever toute ambiguïté, l'historien Vasco Ronchi suggère de réserver le terme « lumière » aux seuls phénomènes visibles (clarté du jour, sources lumineuses, impacts visibles à la surface des objets éclairés, en d'autres termes, la lumière « qui se voit ») et d'utiliser l'expression « radiation optique » pour désigner l'agent invisible capable d'impressionner l'œil. Voir Ronchi V. *L'optique, science de la vision*, Masson, 1966. C'est une idée identique qui a conduit Jung à proposer d'expliquer la vision en remplaçant le terme *lumière* (dans son acception physique) est par le terme *radiation*. Voir Jung W. Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties, *Workshop Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical studies*, Bremen, 1991. Le fait d'employer un terme différent de celui utilisé dans le langage courant devrait aider les élèves à construire un nouveau concept optique. C'est également un moyen de leur signifier la difficulté du processus d'abstraction sous-tendu par cette nouvelle construction. Enfin, il semble important de rappeler que l'introduction dans l'enseignement d'un vocabulaire inédit constitue, en général, une zone particulière d'attention pour les élèves. L'inconvénient de cette proposition est que les physiciens (considérés comme population de référence) utilisent le mot *lumière* dans tous les sens précédemment indiqués, ce qui risque de

des tâches essentielles de l'élève consiste à accepter une signification du mot « lumière » distincte de celle qui lui est familière. Cette tâche paraît d'autant plus ardue que le mot « lumière » renvoie à des entités dont les manifestations empiriques sont opposées.

2.3. Le mécanisme de la vision dans les programmes de sciences physiques du collège et de l'école élémentaire

Les programmes 2002 de sciences du cycle III de l'école élémentaire et ceux du cycle central du collège font référence à certaines représentations d'élèves à propos du mécanisme de la vision (voir Tableau 2 rubrique « Prise en compte des représentations des élèves »).

Programmes de sciences du cycle III ²⁶	Programmes de sciences physiques du collège ²⁷
Prise en compte des représentations des élèves	
« Les élèves n'ont pas l'idée d'une propagation de la lumière (...) Les élèves ne conçoivent pas qu'un objet quelconque puisse envoyer de la lumière vers nos yeux (...) Le mécanisme de la vision est souvent conçu suivant le modèle erroné du 'rayon visuel' partant de l'œil pour aller capter l'image de l'objet »	« Il convient dès le début de corriger la représentation selon laquelle l'œil émet de la lumière »
Connaissances et compétences attendues	
« Pour qu'un objet soit vu, il est nécessaire que la lumière issue de cet objet entre dans l'œil ».	« Pour une première approche de la diffusion, on développera l'idée que les objets diffusants renvoient la lumière dans toutes les directions (...) Savoir que pour voir, il faut recevoir de la lumière. »

Tableau 2 : Ce tableau présente des extraits des programmes 2002 d'optique du cycle III de l'école élémentaire et du cycle central du collège.

Nous remarquons que celles-ci paraissent différentes d'un niveau à l'autre alors que nous pensons au contraire que les idées des élèves de primaire ne présentent pas de différences

provoquer un décalage entre le vocabulaire des élèves et le vocabulaire de référence. Il semble donc plus approprié de conserver le même terme *lumière* tout en rendant explicite sa nouvelle signification.

²⁶ Lumière et ombres, Fiche connaissance n°17, *Documents d'Accompagnement des Programmes de Sciences du cycle 2 et 3*, 2002, p. 31.

²⁷ *Programmes de physique-chimie des classes de 5^e et de 4^e*, p. 31.

majeures avec celles de leurs aînés du collège. En outre, nous doutons que les élèves de collège imaginent que leurs yeux émettent de la lumière. Une analyse approfondie des raisonnements des élèves à propos de la vision devrait nous permettre de préciser ces quelques points.

Par ailleurs, l'objectif de connaissance semble identique de part et d'autre : il s'agit pour l'élève de savoir que pour voir un objet il est nécessaire que la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil de celui qui le regarde. Mais il apparaît là encore que la formulation diffère d'un niveau à l'autre. Celle du collège -« pour voir il faut recevoir de la lumière »- s'avère beaucoup moins précise que celle de l'école primaire. En particulier, il n'est pas indiqué que la lumière reçue vient des objets et qu'elle pénètre dans l'œil.

Pourtant, les programmes d'optique de collège ont subi, à partir de 1992, l'influence explicite de la recherche en didactique²⁸. En 1998, l'enseignant y trouvait exprimée une piste de travail sur « Lumière et vision » orientée à partir des trois principes suivants :

Pour être vu, un objet doit envoyer de la lumière dans l'œil. Sauf accident, la lumière se propage en ligne droite. Un objet diffusant, éclairé en lumière blanche, renvoie de la lumière dans toutes les directions²⁹.

Ces trois principes étaient complétés par l'introduction du phénomène de la diffusion (responsable du renvoi de la lumière par les sources secondaires) et par une présentation des sources primaires de lumière. Si l'on considère la façon dont l'explication du mécanisme de la vision est énoncée dans les programmes de 1998 -« Pour être vu un objet doit envoyer de la lumière dans l'œil »- on peut légitimement se demander pourquoi les rédacteurs ont choisi de substituer à cette formulation plutôt convaincante, un nouvel énoncé qui s'avère incomplet.

Quoiqu'il en soit, le concept de lumière est au cœur des programmes de collège et de ceux de l'école élémentaire de 2002. L'intention des rédacteurs des programmes est donc que les élèves utilisent la lumière pour expliquer la vision de façon pertinente. Or les nombreuses recherches en didactique réalisées dans le domaine de l'optique montrent que ceux-ci peinent

²⁸ Viennot L. Recherche en didactique et nouveaux programmes : convergences, in *Didaskalia*, n°3, 1994, 125-136.

²⁹ Extrait du B.O. n°10 du 15 octobre 1998.

à utiliser la lumière de façon adaptée, y compris à des niveaux de connaissance élevés. Il semble donc que les efforts de l'institution pour prendre en compte les difficultés de l'enseignement du mécanisme de la vision (qu'elles soient liées aux représentations initiales des élèves, à la complexité du savoir à enseigner, ou à l'ambiguïté du vocabulaire utilisé – celle du mot « lumière » notamment-) ne soient pas suffisants pour permettre aux professeurs des écoles et à ceux de collèges de proposer un enseignement du mécanisme de la vision efficace. En outre les expériences disponibles ne peuvent pas illustrer le mécanisme de la vision puisque le trajet de la lumière entre l'objet et l'œil au cours d'une vision normale est sensoriellement indétectable.

L'enseignement du mécanisme de la vision demeure donc problématique et c'est en utilisant l'histoire des sciences que nous souhaitons, à notre tour, élaborer un outil qui permette d'assister l'élève dans l'acquisition de ce savoir à forte composante conceptuelle. Nous tenterons d'apporter des réponses aux questions suivantes : Comment l'enseignement du mécanisme optique de la vision à l'école et au collège peut-il bénéficier efficacement de l'apport historique ? Est-il possible de construire un outil d'apprentissage performant qui s'appuie sur l'histoire des théories de la vision ? Et enfin, l'histoire des sciences et la recherche en didactique peuvent-elles s'éclairer l'une l'autre ? Ces questions s'ancrent dans une problématique plus générale du rapprochement entre histoire des sciences et enseignement scientifique, problématique qui a généré un certain nombre de travaux philosophiques, psychologiques et didactiques qu'il convient d'analyser maintenant.

3. Education scientifique et histoire des sciences : émergence d'une collaboration

Dès le 18^e siècle, émerge chez certains philosophes des Lumières l'idée que la chronologie historique peut influencer l'élaboration des contenus propres à l'instruction. Pour Condorcet, le développement mental et l'élaboration des connaissances sont liés à l'idée de progrès et d'évolution dans le temps :

Si l'on suit le développement de l'espèce humaine de générations en générations, il présente alors le tableau des progrès de l'esprit humain. Ce progrès est soumis aux mêmes lois générales qui s'observent dans le développement individuel de nos facultés, puisqu'il

est le résultat de ce développement, considéré en même temps dans un grand nombre d'individus réunis en société³⁰.

La correspondance qu'établit alors Condorcet entre le développement de l'espèce humaine et celui de l'individu le conduit à imaginer une organisation pédagogique des connaissances sur le modèle des progrès de l'esprit humain. C'est ainsi qu'il écrit son *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* en étroite collaboration intellectuelle avec son *Projet général de l'instruction publique*, en 1792. Moins d'un siècle plus tard la Loi Biogénétique Fondamentale du naturaliste allemand Ernst Haeckel oriente de façon encore plus radicale les recherches portant sur l'acquisition des connaissances.

3.1. Psychogenèse et histoire des sciences, comment penser autrement les lois récapitulationnistes de Haeckel

Au 19^e siècle Haeckel tenta de retrouver dans l'embryologie les étapes de l'évolution depuis les formes élémentaires de la vie. Les résultats de ses travaux le conduisirent à penser qu'outre l'évolution biologique, celle de l'esprit de l'enfant serait analogue à l'histoire du développement de l'esprit humain :

Le développement psychique de chaque enfant n'est qu'une brève répétition de l'évolution phylogénétique³¹.

Ce sont sans doute ces quelques mots qui inspirèrent les premières théories selon lesquelles il existerait un parallélisme entre la formation scientifique personnelle de l'individu et l'évolution historique de la science. En d'autres termes, et par suite d'une transposition de la « Loi Biogénétique Fondamentale de l'ordre biologique à l'ordre mental » de Haeckel que nous venons de rappeler, il n'était pas rare de trouver au début du 20^e siècle des formulations extrêmes, telles que celle que Paul Langevin développa lors d'une conférence en 1931 :

Ce développement progressif de l'œuvre scientifique en ses trois étapes, il paraît indispensable de le respecter, de le reproduire dans l'initiation donnée à l'école en l'adaptant à chaque instant au développement intellectuel des élèves qui se poursuit, conformément à la grande loi biologique, suivant un rythme parallèle à celui de l'évolution

³⁰ Condorcet J. (de) *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* (1793), Flammarion, 1988, p. 80.

³¹ Haeckel E. cité par G. Canguilhem et al. *Du développement à l'évolution au 19^e siècle*, PUF, 1962, p. 44.

de l'espèce (...). En respectant cet ordre, en éclairant le pédagogique par l'historique on résoudra pour le mieux le problème de l'initiation scientifique³².

Ainsi, pour Langevin, la culture scientifique de l'enfant doit obligatoirement passer par les mêmes étapes que la communauté scientifique dans son histoire. Les positivistes, par la voix d'Auguste Comte, n'étaient pas loin de soutenir une théorie identique :

En étudiant le développement total de l'histoire humaine dans ses diverses sphères d'activité, depuis son premier essor jusqu'à nos jours, je crois avoir découvert une grande loi fondamentale (...). Cette loi consiste en ce que chacune de nos conceptions principales, chaque branche de nos connaissances, passe successivement par trois états théoriques différents : l'état théologique ou fictif ; l'état métaphysique ou abstrait ; l'état scientifique ou positif³³.

3.2. Histoire des sciences et développement cognitif : le point de vue des psychologues

La psychanalyse naissante a fait une grande place à l'étude de la reviviscence individuelle de la pensée ancestrale. Pour Sigmund Freud lui-même :

Les jeux imaginatifs, les contes auxquels se complait l'enfant, certaines de ces créations artistiques seraient un retour à la forme mythique sous laquelle s'exprimaient les plus anciennes civilisations, et qu'utiliseraient aujourd'hui les désirs réprouvés par la nôtre pour se manifester tout en se dissimulant. Des situations qui appartenaient aux premiers âges de l'humanité et que la morale des peuples n'a cessé de combattre pourraient ainsi se survivre en chaque individu³⁴.

Profitant de l'élan psychanalytique, le psychologue Jean Piaget a longtemps défendu une position très proche des théories extrêmes de Langevin. Dans un texte de 1928, Piaget identifie l'adulte à un physicien en lui attribuant une forme de connaissance qui se confond avec la pensée scientifique³⁵. Pour Piaget, qui va plus loin que le philosophe Léon Brunschvicg dont il a suivi les cours et lu les ouvrages, si l'adulte est scientifique, l'enfant est tout à la fois pré-scientifique, et prélogique³⁶. Quelques années plus tard, lorsqu'il construit

³² Langevin P. *La pensée et l'action*, Editions Sociales, 1964, p. 215.

³³ Comte A. *Cours de philosophie positive*, cité par P. Macherey, *Comte. La philosophie et les sciences*, PUF, 1989, p. 17.

³⁴ Freud S. cité par H. Wallon, *L'évolution psychologique de l'enfant* (1941), Colin, Paris, 2002, p. 31.

³⁵ Piaget J. Les trois systèmes de la pensée de l'enfant. Etude sur les rapports de la pensée rationnelle et de l'intelligence motrice (1928), *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, t. 28, cité par L. Maury, in *Piaget et l'enfant*, PUF, 1984, p. 56.

³⁶ Le terme est utilisé par le philosophe et sociologue Lucien Lévy-Bruhl, dans ses études sur la « mentalité primitive ». Ces études intéressent vivement les sociologues qui voient souvent dans le développement de

ses *stades*, Piaget est amené à chercher ses données comparatives dans un autre domaine que celui des comportements psychiques : il les cherche dans l'histoire des sciences et place les *stades* sur la même ligne des temps que celle de l'évolution des connaissances scientifiques. Il assigne ainsi une position particulière à l'émergence de la scientificité. Henri Wallon se montrera critique envers les propos de Piaget, et ceux plus radicaux encore de Langevin. En 1941, paraît un ouvrage dans lequel Wallon dénonce les incohérences drainées par les théories récapitulationnistes. Pour Wallon, considérer la psychogenèse des connaissances comme une réplique chronologiquement parfaite de l'histoire de la pensée scientifique, revient à affirmer que, par l'effet d'un déterminisme particulier, un programme identique dirige le développement individuel et historique :

Le parallélisme onto-phylogénétique non seulement est privé de critères objectifs, mais il comporte d'insurmontables invraisemblances. Si les étapes de la vie mentale chez l'enfant avaient pour prototype et pour condition les étapes de la civilisation humaine, le lien entre les termes qui se répondent dans les deux séries ne pourrait être qu'une structure matérielle dont le rang dans le développement et de l'individu et de l'espèce serait strictement déterminé. Entre des individus appartenant à des niveaux différents de civilisation, l'intervalle serait égal au nombre de générations nécessaires pour que se succèdent la série des structures intermédiaires, c'est-à-dire qu'il serait infranchissable, non seulement pour eux-mêmes, mais pour une portion plus ou moins étendue de leur postérité³⁷.

Pourtant, Wallon reconnaît qu'il peut exister des similitudes entre les opérations mentales de l'enfant et celles des Anciens. A l'idée de parallélisme de développement, Wallon préfère celle de similitude d'attitude :

La similitude qui peut se constater entre certaines attitudes ou opérations mentales des enfants et de ceux que l'on a appelés en gros les primitifs, paraît explicable par une similitude, toute relative d'ailleurs, de situation (...). La comparaison de l'un à l'autre sans doute est utile, non pas qu'elle nous fasse retrouver chez l'enfant un stade du passé, mais parce qu'elle nous permet de démêler la part qui revient, dans l'exercice de la pensée, aux instruments et aux techniques de l'intelligence³⁸.

l'enfant une « récapitulation » de l'évolution de l'espèce humaine (voir Haeckel). Pour Lévy-Bruhl, l'enfant est comparé au primitif. Léon Brunschvicg reprend l'idée de la pensée prélogique et lui associe un caractère scientifique (voir en particulier, Brunschvicg L. *Expérience humaine et causalité physique*, PUF, 1949). Enfin, pour Piaget, la pensée enfantine est à la fois prélogique et pré-scientifique par opposition à celle de l'adulte scientifique et logique.

³⁷ Wallon H. *L'évolution psychologique de l'enfant*, op. cit. p. 32.

³⁸ Ibid. p. 33. Le terme « primitif » utilisé par Wallon n'est pas péjoratif. Il désigne, entre autre, les savants de l'Antiquité que Wallon considère comme des « primitifs éminents de leur clan » (voir p. 34).

Inspiré sans doute des réflexions de Wallon, Piaget nuancera plus tard son propos. A la fin de sa vie il souligne son désaccord avec toute théorie dérivée du recapitulationisme haeckelien, dans un ouvrage posthume, rédigé en collaboration avec Rolando Garcia³⁹ :

Il n'est, cela va de soi, pas le moins du monde question d'invoquer ici un parallélisme onto-phylogénétique au sens de Haeckel et cela pour trois raisons, toutes trois évidentes : a) on ne connaît pas d'exemple de transmission héréditaire des idées ; b) il n'y a pas de filiation héréditaire entre Aristote ou Buridan, par exemple, et les petits Genevois et Polonais qui nous ont servi de sujets ; c) mais surtout, l'enfant est antérieur à tous les adultes de l'histoire, puisqu'ils ont tous commencé par être des enfants⁴⁰.

Voilà une position claire et argumentée, mais qui peut surprendre par la rupture qu'elle constitue avec les opinions plus radicales qui furent antérieurement celles de Piaget. Piaget et Garcia reconnaissent néanmoins qu'il peut y avoir convergence entre des théories appartenant au passé de la science et certaines constructions psychogénétiques, et qu'il est, à titre d'exemple, possible de comparer l'histoire de *l'impetus* et sa psychogenèse :

La comparaison entre l'histoire de *l'impetus* et sa psychogenèse consiste en une mise en correspondance entre deux développements situés à des plans extrêmement différents, mais dont les relations deviennent intelligibles si l'on se réfère à une loi fondamentale des constructions cognitives : elles ne se succèdent pas linéairement, mais donnent lieu, stade après stade, à des reconstructions de ce qui précède avec intégration de ce qui suit⁴¹.

Autrement dit, les idées construites à un niveau supérieur de pensée, même lorsqu'il s'agit de celles d'un physicien, s'appuient sur les précédentes et toute réflexion nouvelle procède d'une réorganisation des contenus des niveaux inférieurs. Pour Piaget et Garcia, il est clair qu'il existe une parenté entre « l'épistémologie historico-critique » et l'épistémologie génétique, car les deux sortes d'analyse conduisent à retrouver des instruments et des mécanismes semblables, en particulier dans la manière dont un niveau antérieur conditionne la formation du suivant.

La mise en correspondance du développement historique de la science et de celui de l'individu dans sa construction scientifique demeure toujours d'actualité. Loin d'un parallélisme strict, les psychologues s'interrogent davantage sur l'existence de similitudes entre les raisonnements actuels d'une personne sur un sujet et les idées antérieurement

³⁹ Piaget J. et Garcia R. *Psychogenèse et histoire des sciences*, Flammarion, 1983.

⁴⁰ Ibid. 80-81.

⁴¹ Ibid. p. 81.

développées dans les communautés de savants⁴². Ces similitudes peuvent s'observer non seulement à un instant *t* du développement historique et psychogénétique, idée pour idée (Piaget et Garcia parlent « d'analogies de contenus »), mais aussi au cours d'une restructuration mentale observée sur une durée. En d'autres termes, une analogie peut porter aussi bien sur une idée développée à un moment donné, que sur un mécanisme de réorganisation mentale. Examinons à présent quelques pistes ouvertes par la philosophie des sciences.

3.3. Histoire des sciences et développement cognitif : le point de vue philosophique

Le philosophe américain Thomas Kuhn a propagé chez les philosophes et historiens des sciences la formule, certes quelque peu excessive, selon laquelle l'ontogénie cognitive récapitule la phylogénie scientifique. Pour Kuhn, l'attention portée aux raisonnements des enfants peut orienter la lecture que l'historien fait du développement de la science. Largement inspiré des travaux de Piaget, Kuhn se propose de réfléchir dans *La tension essentielle* à la notion de causalité dans le développement de la physique :

Quelles sont les raisons pour lesquelles un historien des sciences peut être appelé à écrire pour des psychologues de l'enfant sur un sujet tel que la causalité en physique ? L'une des premières réponses est bien évidente à tous ceux qui sont familiers des recherches de Jean Piaget. Ses remarquables travaux sur les notions d'espace, de vitesse, de temps ou sur le monde lui-même, chez l'enfant, ont constamment révélé de frappants parallèles avec les conceptions soutenues par des hommes de science d'époques précédentes. Si de telles relations existent pour la notion de causalité, leur mise en évidence doit intéresser tant le psychologue que l'historien (...) **Une partie de ce que je sais sur la manière de poser des questions à des savants disparus, je l'ai appris en examinant les interrogatoires de Piaget avec des enfants vivants**⁴³.

L'étude didactique des représentations individuelles doit pouvoir éclairer l'historien des sciences dans sa tâche de reconstruction.

Le philosophe Gaston Bachelard aborde le problème du parallélisme entre psychogenèse et histoire des sciences à travers la notion *d'obstacle épistémologique* qui peut être étudiée tant

⁴² C'est le cas notamment de la psychologue Susan Carey, voir Carey S. *Conceptual change in childhood*, Cambridge, MIT Press, 1985.

⁴³ Kuhn T. *La tension essentielle, tradition et changement dans les sciences* (1977), Gallimard, 1990, p. 56. C'est nous qui soulignons.

dans le développement historique de la pensée scientifique que dans la pratique de l'éducation. Dans *La formation de l'esprit scientifique*, Bachelard consacre un chapitre complet à « l'obstacle substantialiste »⁴⁴. La propension de l'esprit à « bloquer » des propriétés matérielles sur des objets abstraits de la physique (électricité, lumière...) est une constante de l'histoire des sciences. D'après Bachelard, elle est un obstacle à son développement rationnel. A propos des explications électrostatiques proposées au 18^e siècle et dont Bachelard se fait l'analyste, nous pouvons lire :

Que les corps légers *s'attachent* à un corps électrisé, c'est là une image immédiate de certaines attractions (...). Le phénomène immédiat va être pris comme le signe d'une *propriété substantielle* : aussitôt toute enquête scientifique sera arrêtée ; la réponse substantialiste étouffe les questions. C'est ainsi qu'on attribue au fluide électrique la qualité glutineuse, onctueuse, tenace (...). On pense comme on voit, on pense ce qu'on voit : une poussière *colle* à la paroi électrisée, donc *l'électricité est une colle*, une glu⁴⁵.

Bachelard précise que cette tendance substantialiste est également présente dans les raisonnements de la physique naïve, et il ajoute que l'accession à la scientificité doit nécessairement passer par une *rupture épistémologique* entre la connaissance pré-scientifique et la connaissance scientifique. Cette rupture serait commune à la psychogenèse et à l'histoire des sciences.

En outre, dans le « Discours Préliminaire » de *La formation de l'esprit scientifique*, Bachelard propose de distinguer trois périodes correspondant aux différents âges de la pensée scientifique historique : l'état pré-scientifique de l'Antiquité au 18^e siècle, l'état scientifique de la fin du 18^e siècle au début du 20^e, et enfin, l'ère du nouvel esprit scientifique à partir de 1905⁴⁶. Il laisse entendre que ces périodes pourraient dessiner de façon grossière l'évolution psychologique d'un individu dans le cadre de la formation de son esprit aux sciences.

En France, les travaux de Bachelard ont très largement influencé la recherche en didactique des sciences. Ceux-ci ont eu le mérite de reconnaître que l'apprentissage scientifique procède d'une interaction avec un patrimoine de connaissance déjà présent dans l'esprit de l'élève. Malgré tout, l'idée que ce « déjà-là » constitue un obstacle pour l'enseignement ne semble pas

⁴⁴ Ibid. 97-129.

⁴⁵ Ibid. 102-103.

⁴⁶ Bachelard G. *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, 1938, 6-7.

faire l'unanimité au sein des chercheurs. Nous retiendrons pour notre part qu'il semble exister des tendances de raisonnements communes aux élèves et aux savants qui rendent la formation de l'esprit scientifique difficile, tant dans son développement historique que dans son développement individuel.

4. L'enseignement du mécanisme optique de la vision : Les réponses de l'histoire des sciences à des interrogations didactiques

L'histoire je le crains ne permet guère de prévoir ; mais associée à l'indépendance de l'esprit, elle peut nous aider à mieux voir.

Paul Valéry

De la même façon que Paul Valéry considère l'histoire comme un moyen d'éclairer les attitudes humaines du présent, ne pouvons-nous pas considérer l'histoire des sciences comme un outil pour comprendre les attitudes actuelles des élèves face à l'enseignement scientifique, et pour suggérer un certain nombre de pistes de réflexion pédagogique ?

Dans l'élan insufflé par la psychologie du développement et par la philosophie, s'intéresser aux conceptions dans l'histoire de la pensée scientifique constitue une orientation particulière de la recherche en didactique. Certains chercheurs ont notamment interrogé le bien-fondé des analogies historico-psychogénétiques en se demandant ce que de telles analogies pouvaient apporter à la recherche en didactique.

4.1. L'attention portée aux raisonnements des élèves : l'histoire des sciences comme outil d'analyse ?

Il n'est pas rare de trouver dans les raisonnements des élèves des idées proches de celles que l'on rencontre dans l'histoire des sciences. S'il existe bien une tendance de la pensée naturelle (qu'elle soit contemporaine ou plus ancienne) à matérialiser les concepts de la physique, que peut attendre la recherche en didactique d'une mise en perspective historico-didactique plus générale ? En d'autres termes, et pour reprendre une question posée par Laurence Viennot :

Parallélisme ou pas, avec une histoire recomposée rationnellement ou pas, par petits ou par gros morceaux, au fond, quelle importance ? Dans le grand magasin de l'histoire des sciences, ne trouvera-t-on pas toujours une prévision et son contraire assurés d'avance de

rapprochements partiels et sans risque ? Que gagne-t-on et que perd-on pour l'analyse des raisonnements actuels ?⁴⁷

L'analyse qui suit devrait apporter quelques éléments de réponse à ces questions fondamentales, et induire ainsi la définition d'un cadre méthodologique d'utilisation des interactions historico-didactiques que nous entendons exploiter.

4.1.1. Des analogies en question

Les didacticiens Abdelmajid Benseghir et Jean-Louis Closset ont montré que les élèves utilisent, dans leur analyse des circuits électriques, des connaissances électrostatiques partielles et le plus souvent « mal digérées »⁴⁸. Dans l'élaboration du concept de circuit électrique, l'histoire des sciences est témoin d'un processus identique :

Les représentations des élèves à propos du circuit électrique pourraient donc bien avoir une composante électrostatique qui s'articulerait avec les autres difficultés d'élaboration du concept étudié. Ce processus n'est pas le privilège de la psychogenèse mais pourrait bien aussi concerner la phylogenèse (...). L'analyse historique a permis de mettre en évidence, dans les démarches d'appréhension des phénomènes de courant, un processus de réinvestissement des conceptions et de procédures opératoires liées à une première approche de l'électricité statique⁴⁹.

Dans le domaine de la biologie, Daniel Raichvarg a montré que certains élèves de collège expliquaient le principe de la reproduction humaine d'une façon tout à fait comparable à celle que l'on trouvait au 19^e siècle⁵⁰. Enfin, l'idée qu'un corps en mouvement possède un certain élan (*impetus*) est partagée par les savants de la mécanique pré-galiléenne et la plupart des élèves et des étudiants actuels⁵¹.

Dans un article de 1985, Edith Saltiel et Laurence Viennot étudient l'intérêt de la comparaison des théories de l'*impetus* du 6^e au 14^e siècle avec les idées d'étudiants de lycée

⁴⁷ Laurence Viennot, communication personnelle, avril 2004.

⁴⁸ Benseghir A. et Closset J.L. Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique, in *Didaskalia*, n°2, INRP, 1993, 31-47.

⁴⁹ Ibid.p. 32.

⁵⁰ Raichvarg D. La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ? in *ASTER*, n°5, 1987, 3-34.

⁵¹ Halbwachs F. *La pensée physique chez l'enfant et le savant*, Delachaux et Niestlé, 1974, Piaget J. et Garcia R. *Psychogenèse et histoire des sciences*, op. cit. Carey S. *Conceptual change in childhood*, op. cit.

et d'université face à des questions de cinématique et de dynamique⁵². Les auteurs reconnaissent sans équivoque l'existence de similitudes de raisonnement entre les théories de la mécanique préclassique et les idées des étudiants, mais se demandent quels bénéfices la recherche en didactique et l'enseignement des sciences peuvent attendre de la mise en évidence de telles analogies. Elles reprennent pour cela un exemple qui demeure couramment utilisé dans le cadre des recherches en psychogénétique ou en didactique. Selon les résultats de ces recherches, lorsque l'on demande à un étudiant de commenter le lancer d'un objet, il fournit fréquemment une interprétation où la notion d'élan stocké dans l'objet joue à peu près le même rôle que l'*impetus* : le mouvement implique une cause et lorsque c'est nécessaire, cette cause peut être recherchée à l'intérieur de l'objet en mouvement⁵³.

Pour autant, les auteurs soulignent que les parallélismes ainsi évoqués ne doivent pas être pris au sens strict. D'abord, les raisonnements historico-psychogénétiques sont élaborés dans des contextes bien différents. Certaines théories historiques sont nées dans le cadre de contingences philosophiques particulières qui rend leur compréhension complexe et leur transposition périlleuse⁵⁴. Ensuite, la logique des raisonnements des élèves à propos de la chute des graves ne suit pas un cheminement calqué sur une logique historique particulière. Elle est tantôt proche des idées d'Aristote, tantôt proche de celles de Buridan. Et l'on peut

⁵² Voir Saltiel E. et Viennot L. What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ? GIREP, Utrecht, 1985.

⁵³ Saltiel E. et Viennot L. What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ? op. cit. Notre traduction. Pour un énoncé de la théorie de l'*impetus* voir F. Bonamici, *De Motu* (1611), cité par Koyré A. *Etudes Galiléennes*, Hermann, Paris, 1966, p. 43.

⁵⁴ Toujours à propos de l'idée d'*impetus*, Saltiel et Viennot soulignent les limites des analogies entre les idées des Anciens et celles des élèves. Elles remarquent en particulier qu'influencé par les théories aristotéliennes, Tycho Brahé distingue deux types de mouvements, l'un *naturel* et l'autre *violent* et refuse de combiner deux *impetus*. Ce qui pouvait représenter un obstacle au 17^e siècle n'en est plus un pour les étudiants d'aujourd'hui qui font coexister sans état d'âme différentes forces à l'intérieur d'un même objet en mouvement. La distinction aristotélienne des mouvements n'a pas de sens pour la pensée pré-scientifique actuelle. Les auteurs développent ensuite un autre exemple qui montre sans équivoque les limites des parallélismes historico-psychogénétiques. C'est un fait, les étudiants et les savants du 17^e siècle reconnaissent donc de façon similaire qu'un objet projeté reçoit, de la part du lanceur, une « force », une vertu impressée, un *impetus*, qu'il conserve pendant le temps où il demeure en mouvement. Reconnaître qu'il existe une transmission de l'*impetus* permet aux savants pré-galiléens de prévoir qu'un objet lâché d'un support mobile conserve le mouvement du support. Pour Giordano Bruno, il ne fait aucun doute qu'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement uniforme tombera au pied de celui-ci. En revanche, la majorité des étudiants déclare qu'une clé lancée verticalement par un personnage immobile sur un tapis roulant, tombe derrière le lanceur. Cette fois, et contrairement à la démarche historique qui demeure cohérente dans son utilisation de l'*impetus*, les étudiants privilégient un raisonnement dans lequel prévaut la disparition du lien physique entre le mobile et son support plutôt qu'un raisonnement en terme d'*impetus*. Dans ce cas, le « capital de force » qui aurait dû se manifester pour l'objet entraîné dans les mains du lanceur semble disparaître dès que l'objet est lâché.

imaginer qu'il sera toujours possible de rapprocher une prévision d'élève d'une prévision historique. Parle-t-on alors de similitude ou de simple coïncidence comme le suggère Laurence Viennot :

Avec une pierre qui tombe derrière le mât ou une clé qui tombe en arrière des pieds sur un tapis roulant, on n'a pas Aristote, on a une coïncidence, tout au plus (...). Plus les rapprochements avec lesquels joue l'interprétation sont partiels, reconstruits par morceaux disparates, moins ils sont susceptibles de porter en avant l'analyse, et plus ils risquent de la bloquer⁵⁵.

Autrement dit, si l'on s'appuie sur une histoire des sciences morcelée et parcellaire en allant chercher à droite et à gauche des prévisions conformes à celles que l'on trouve dans les classes, on peut difficilement (dans ces conditions) envisager une analyse des raisonnements des élèves cohérente et surtout légitime. En réalité, les analogies historico-psychogénétiques (lorsqu'elles existent) ne doivent pas dispenser le chercheur d'une investigation sur les conceptions des élèves. Ainsi, la détection des difficultés didactiques est première et indépendante, et il n'est nullement besoin d'invoquer l'idée d'un parallélisme pour analyser la logique du raisonnement commun. C'est la raison pour laquelle une partie de notre recherche sera consacrée à l'étude des conceptions initiales des élèves à propos de la vision, indépendamment de toute préoccupation historique. A vouloir analyser les raisonnements des élèves avec l'aide de l'histoire des sciences, on réduit le champ des investigations didactiques à une dimension unique et discutable. La spécificité didactique perd son identité, une partie de son indépendance, et l'analyse des raisonnements risque de perdre en cohérence, voire d'être « bloquée ». Alors que faire des analogies lorsqu'elles existent ? Doit-on toutes les classer au rang des coïncidences sans que l'enseignant puisse en tirer un quelconque profit ? Peut-être pas.

4.1.2. Un nouveau statut pour l'erreur, une nouvelle image de la science

Un regard sur l'histoire des sciences peut inciter l'enseignant à davantage de tolérance. En particulier, il constitue un moyen efficace de relativiser l'erreur de l'élève⁵⁶. Pour reprendre

⁵⁵ Laurence Viennot, communication personnelle, avril 2004.

⁵⁶ Il ne s'agit pas de banaliser l'erreur de l'élève sous le prétexte qu'elle trouve une résonance dans l'histoire, ou au contraire de la considérer comme la preuve que l'élève n'a pas suffisamment travaillé. Il s'agit plutôt de

une idée développée par Françoise Balibar dans un plaidoyer en faveur de l'introduction de l'histoire des sciences dans la formation des professeurs des écoles, aucun enseignant ne peut être certain de ne pas se retrouver un jour face à un raisonnement analogue à celui d'une période historique donnée. Ainsi, en parlant de la notion de mouvement, Balibar suggère ceci :

Ne vaut-il pas mieux que les futurs professeurs d'école soient informés des diverses conceptions de l'espace ayant prévalu au cours des siècles avant de réprimer, au nom du prétendu bon sens, telle ou telle conception spontanée développée par tel ou tel élève ?⁵⁷

L'erreur développée par l'élève n'a pas plus à être condamnée que celle du savant. Elle obéit à des règles de raisonnement particulières parfois proches de celles qui ont autrefois guidé certaines démarches scientifiques. Ce regard porté sur l'erreur dans l'histoire donne de la science une image dynamique et humaine bien éloignée de celle véhiculée par un enseignement parfois trop dogmatique.

En effet, dans la plupart des situations d'enseignement, seule la science validée est présentée. Ainsi, le *paradigme* du moment, cet ensemble de « découvertes scientifiques universellement reconnues »⁵⁸ aujourd'hui, a tendance à se transformer rapidement en dogme. D'après Jean Rosmorduc, la tendance actuelle de l'enseignement est de se limiter aux résultats, en laissant de côté les hésitations :

Un enseignement dogmatique est plus facile à dispenser, moins insécurisant pour le professeur que celui qui met l'accent sur les doutes, les contestations possibles, les remises en cause probables (...). Si l'on a besoin de former rapidement un solide manipulateur de théories et d'instruments d'aujourd'hui, un enseignement axiomatique peut s'avérer très efficace. Le souci d'une rentabilité immédiate l'emporte⁵⁹.

Une telle pratique donne aux élèves une piètre image des sciences et occulte l'essence de toute démarche scientifique. Afin de lutter contre un dogmatisme ravageur, il convient d'orienter l'enseignement des sciences vers la formation d'un esprit critique. Le Conseil National des Programmes ne s'y est pas trompé, qui publiait en 1992 :

considérer l'erreur comme un indice témoignant d'une difficulté qui mérite des moyens pédagogiques particuliers.

⁵⁷ Balibar F. L'histoire des sciences : une école de pensée critique, *Pour une autre approche des savoirs scientifiques*, Hachette Education.

⁵⁸ Kuhn T. *La structure des révolutions scientifiques*, trad. L. Meyer, Flammarion, réed. 1983, p. 28.

⁵⁹ Rosmorduc J. *L'histoire des sciences*, Hachette Education, 1996, p. 12.

L'enseignement des sciences doit aider à la formation de l'esprit critique, c'est à dire: apprendre à considérer un problème en cernant les difficultés une à une, savoir essayer et vérifier, construire sa connaissance soi-même par jeu d'essais et d'erreurs, ne pas se contenter d'une attitude passive devant une vérité révélée⁶⁰.

Parce qu'elle est le témoin des démarches ayant permis l'émergence des théories scientifiques, l'histoire des sciences peut, de toute évidence, participer au développement de l'esprit critique des élèves. Et améliorer de façon considérable l'image que les élèves ont des sciences ainsi que nous le rappelle Hélène Merle :

Ces situations permettent de sensibiliser de très jeunes élèves au fait que la science est le fruit de recherches qui se sont déroulées depuis des siècles (...). Notre objectif est de donner aux élèves le goût du questionnement, l'envie de chercher des réponses. Une approche inspirée de l'histoire des sciences va dans ce sens : elle permet de montrer comment le savoir se construit peu à peu, souvent par réfutations de croyances antérieures (...). Au-delà d'une admiration naïve envers quelques illustres savants, c'est une admiration justifiée pour les efforts et les recherches des scientifiques que nous souhaitons développer par ce biais. Un des objectifs visés par cette activité est ainsi de promouvoir l'image de la science comme une aventure humaine⁶¹.

L'histoire des sciences permet des innovations pédagogiques susceptibles de favoriser l'apprentissage tout en développant chez les élèves, grâce à la pratique de l'argumentation et des débats, une autre représentation du fonctionnement de la science et un goût pour la recherche. L'histoire des sciences peut avoir un rôle tout à fait positif sur l'image que la science renvoie aux élèves, même aux plus jeunes.

Alors que l'enseignement du mécanisme optique de la vision demeure difficile, il semble que l'histoire des sciences puisse assister efficacement l'élève dans l'acquisition de ses savoirs. Il ne s'agit pas seulement d'utiliser l'histoire des sciences comme un outil de promotion de la science, mais davantage comme une référence permettant l'élaboration d'un outil cognitif.

⁶⁰ Déclaration du Conseil National des Programmes sur l'enseignement des sciences expérimentales, *Bulletin Officiel de l'Education Nationale*, n°8, 20 février 1992, Paris, 478-492.

⁶¹ Hélène Merle, Histoire des sciences et sphéricité de la Terre, in *Didaskalia*, n°20, 2002, 113-132. A propos du rôle de l'histoire des sciences comme outil de promotion de la science, on pourra également se référer aux travaux des didacticiens espagnols Solbes et Travers. Voir Solbes J. et Travers M. Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de fisica y quimica : mejora la imagen de la ciencia y desarrollo des actitudes positivas, in. *Ensenanza de las ciencias*, Vol.19, n°1, mars 2001, pp.151-162.

4.1.3. L'analyse des difficultés du savoir à enseigner

La perspective historique propose une lecture dynamique et cohérente des processus mis en œuvre dans la résolution de problèmes. Elle peut servir à détecter les moments difficiles, les points d'achoppement que la science a rencontrés au cours de sa construction. Ces éléments devraient constituer des zones d'attention particulières pour le didacticien. Le chercheur peut tirer profit de cette entrée didactique. En particulier, les raisonnements qui ont perduré dans l'histoire en s'opposant au développement rationnel de la science laissent entrevoir les difficultés auxquelles les élèves risquent de se heurter au cours de leur apprentissage scientifique. Le didacticien dispose alors d'un moyen pour mesurer l'ampleur de la difficulté rencontrée par l'élève. Ainsi, la mise en évidence d'obstacles historiques persistants peut-elle donner une idée des difficultés que risque de rencontrer l'élève au cours de son apprentissage. C'est ce que suggère Gabriel Gohau :

Dégager, dans les résistances au progrès scientifique, ces paresse, ces lourdeurs de la pensée qu'on retrouve à chaque génération au cours de son apprentissage, ces lenteurs de l'esprit qui lui font confondre ce qui ressemble et trouver simple ce qui est familier, voici quelle pourrait être la tâche d'une histoire des obstacles. Les obstacles inventoriés, il faudrait inventer des solutions pour les vaincre. Car l'enseignant n'est pas un collectionneur d'obstacles. Certes, amener au niveau conscient chez le jeune, le complexe d'analogies, d'images fausses qui retardent son acquisition du savoir scientifique, serait déjà décisif. Les lourdeurs de la pensée sont d'autant plus actives qu'elles demeurent inconscientes. Cependant, l'histoire des sciences nous offre aussi un moyen de choix pour les vaincre en mettant en relief les voies du franchissement des obstacles. Ce que Bachelard a nommé les actes épistémologiques⁶².

Nous pensons que l'éclairage historique doit permettre à l'enseignant d'agir sur le contenu même de son enseignement. En particulier, chercher dans l'histoire des sciences les ruptures épistémologiques ayant permis l'émergence des théories rationalistes est un moyen d'élaborer une stratégie d'enseignement favorisant l'accès à une conceptualisation efficace.

4.2. L'enseignement du mécanisme optique de la vision : l'histoire comme outil d'exposition

Notre souci n'est pas d'essayer de réduire à tout prix l'écart entre la genèse historique des connaissances scientifiques et la psychogenèse, mais plutôt, à partir d'une difficulté d'enseignement ou d'apprentissage repérée, d'essayer de dégager, à la lumière de la genèse

⁶² Gohau G. Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences, in. *ASTER*, n°5, 1987, p. 66.

historique, les moyens de dépasser cette difficulté. Une analyse didactique des difficultés des élèves à propos de la vision sera confrontée à l'analyse historique.

4.2.1. Le rôle de la lumière dans la vision : une invention de l'esprit

Le génie d'invention se fait une route là où personne n'a marché avant lui.

Voltaire

Si l'explication rationnelle du mécanisme optique de la vision est difficile à concevoir pour la pensée pré-scientifique, c'est qu'elle ne correspond pas aux données de l'expérience sensible. Dire que « pour qu'un objet soit vu il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet entre dans l'œil » nécessite de rompre avec des raisonnements de sens commun dans lesquels l'entrée de lumière dans l'œil est nécessairement associée à la sensation d'éblouissement, où la lumière « reste » sur les objets éclairés, et où la lumière n'est identifiée qu'aux lieux des impacts lumineux. Cela oblige donc à penser l'invisible afin de construire l'idée d'un lien entre les sources et les objets, entre les objets et l'œil, alors même que ce lien ne se voit pas.

Notre propos vient s'inscrire dans la problématique classique des rapports entre la connaissance commune et la connaissance scientifique. Y a-t-il continuité entre les deux, ou au contraire, le passage de l'une à l'autre est-il nécessairement le résultat d'une rupture radicale ? Cette question des modalités de l'acquisition des connaissances scientifiques continue d'alimenter de nombreux débats philosophiques et psychologiques (elle se pose tant au niveau historique qu'au niveau individuel)⁶³. Le fait qu'il soit si difficile pour la pensée

⁶³ Pour le philosophe Gaston Bachelard, les concepts scientifiques sont formulés en polémique contre les notions communes. En cela, la connaissance scientifique procède d'une rupture avec le sens commun qui lui fait généralement obstacle : « Les sciences physiques et chimiques dans leur développement contemporain peuvent être épistémologiquement comme des domaines de pensées qui rompent nettement avec la connaissance vulgaire ». Cette idée est partagée par la psychologue Elisabeth Spelke : l'acquisition des connaissances scientifiques dans le développement de l'individu passe par une succession de ruptures avec le sens commun. Voir Bachelard G. *La formation de l'esprit scientifique* (1938), Paris, Vrin, réed. 1993; et *Le rationalisme appliqué* (1949), PUF, Paris, 1962, ainsi que Spelke E. Principles of object perception, *Cognitive science*, n°14, 26-56. Certains historiens des sciences et d'autres psychologues soutiennent la thèse opposée, et défendent l'idée que la connaissance scientifique est un prolongement sophistiqué de la connaissance commune. Pour le philosophe Willard Quine, le passage de l'une à l'autre s'effectue sans rupture, « par une accumulation de petits pas ». Un autre argument développé par les tenants des thèses continuistes est que la connaissance, quelle soit scientifique ou commune, relève d'une même nécessité fonctionnelle, d'un utilitarisme identique d'ordonner le monde. Pour le sociologue Bernard Schiele « il n'est pas certain que le savoir et la pensée scientifiques

commune d'assimiler certains concepts de la physique, ceux de l'optique en particulier, nous laisse penser qu'il existe bien une différence entre les deux. Dans le domaine de l'optique, cette différence tient, selon nous, à ce que la lumière est une « création de l'esprit » au sens défini par Albert Einstein et Léopold Infeld :

La science n'est pas une collection de lois, un catalogue de faits reliés entre eux. Elle est une création de l'esprit humain au moyen d'idées et de concepts librement inventés⁶⁴.

Considérer la lumière (en tant qu'objet invisible) comme le *stimulus* de la vue est une invention qui marque le passage d'un état de connaissance à un autre. Ce passage, que nous nommerons désormais « saut conceptuel », est subordonné à un cheminement de pensée qui nécessite un certain effort d'abstraction qu'Einstein qualifiait de « sauvagement spéculatif ». Dire que la lumière entre dans l'œil alors que l'on ne perçoit aucune gêne ni aucun éblouissement relève d'un tel passage. A l'expérience sensible (la sensation d'éblouissement) vient se substituer une expérience par la pensée, qui dissocie l'idée d'éblouissement de celle de réception de lumière dans l'œil. Cette dernière peut être ensuite associée à l'explication du mécanisme de la vision par une nouvelle expérience de pensée. Elle conduit à imaginer que les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent. La nécessité d'un tel « saut » nous paraît d'autant plus justifiée ici que le concept physique de lumière se différencie très nettement de la notion de lumière dans son acception commune. Intégré à un système de pensée scientifique, le terme lumière prend une signification tout à fait différente de celle que lui confère la pensée commune. Et nous pensons que ces significations sont incommensurables entre elles⁶⁵.

échappent aux règles qui régissent la genèse, l'organisation ou encore la fonction du savoir et de la pensée naturelle ». Dans ce cas, l'accession à la connaissance scientifique procéderait non pas d'une rupture, mais d'une réorganisation conceptuelle. C'est en tout cas la position défendue par la psychologue Susan Carey. Voir Quine W.O. *Relativité de l'ontologie et autres essais*, trad. J. Largeault, Aubier, Paris, 1977, Schiele B. Note pour une analyse de la notion de coupure épistémologique, *Communications*, vol. 6, n°2-3, 1976, Carey S. *Conceptuel change in childhood*, Cambridge, MIT Presse, 1985.

⁶⁴ Einstein A. Infeld L. *L'évolution des idées en physique* (1936), trad. M. Solovine, Flammarion, Paris, rééd. 1983, p. 274.

⁶⁵ Le terme « incommensurable » est utilisé ici dans le sens défini par le philosophe Thomas Kuhn. Ainsi, une théorie est dite incommensurable à une autre lorsqu'elle utilise de nouveaux concepts ou des concepts anciens dotés d'un rôle nouveau. Kuhn précise que dans les cas de deux théories incommensurables, « les deux partis voient de manière différente les situations auxquelles ils font tous deux appel » et ce faisant puisque « le vocabulaire dans lequel ils discutent se compose des mêmes termes, ils doivent établir entre ces termes et la nature, un rapport différent », Kuhn T. *La structure des révolutions scientifiques* (1962), trad. L. Meyer, Flammarion, rééd. 1983, p. 269.

Si l'acquisition d'un concept scientifique procède d'un saut conceptuel, l'outil expérimental se révèle souvent imparfait. Dans le cas de l'enseignement du mécanisme optique de la vision, il ne suffit pas de présenter expérimentalement la formation de l'image rétinienne pour montrer que la vision d'un objet est le résultat de l'entrée dans l'œil de la lumière issue de cet objet⁶⁶. En revanche, parce qu'elle est témoin du cheminement de pensée ayant conduit à l'élaboration des théories de la vision, nous pensons que l'histoire des sciences peut constituer un moyen d'accompagner l'élève dans sa tâche rationaliste.

4.2.2. L'histoire des théories de la vision : une aide à la réalisation d'un « saut conceptuel »

Expliquer la vision de façon conforme au modèle que nous avons proposé plus haut (voir Figure 11) relève de ce que nous avons appelé un « saut conceptuel » dont le savant cairote Ibn al-Haytham (Alhazen) est à l'origine. Jusqu'alors, les philosophes qui s'intéressent à la vision s'opposent sur le sens de la vue sans envisager l'hypothèse de la nécessité d'un médiateur indépendant entre l'œil et l'objet vu. En posant la lumière comme le *stimulus* de la vue, Alhazen ouvre la voie à un consensus. Au 11^e siècle après JC, il crée un objet conceptuel opérationnel qui modélise l'entité à laquelle l'œil est sensible : la lumière. Il place ainsi les théories de la vision dans un champ abstrait d'explications rationnelles.

Notre objectif est d'accompagner l'élève dans l'accomplissement du saut qui le fera passer d'une interprétation du mécanisme de la vision dictée par le sens commun à une explication commandée par un cheminement rationnel de pensée. Pour cela, nous entendons élaborer une séquence d'enseignement qui s'inspire de la démarche d'Alhazen. Cette idée vient rejoindre les propos de Gérard Lemeignan et d'Annick Weil-Barais qui soulignent l'intérêt d'une exposition en classe des démarches de pensée à l'origine des théories et des concepts enseignés :

La manière habituelle de présenter les programmes ou de rédiger les manuels fait oublier une chose essentielle : la physique est une construction de l'esprit. Cette construction aboutit bien sûr aux concepts et aux théories, aux lois ainsi qu'aux principes que tout professeur connaît. Si ceux-ci ne sont pas associés aux activités intellectuelles qui les ont

⁶⁶ A titre d'exemple, il existe des maquettes de l'œil utilisées dans le cadre de l'enseignement de l'optique (en sciences physiques et en sciences de la vie et de la terre) qui modélisent la formation d'une image rétinienne. Si cette image s'explique par l'entrée dans l'œil de la lumière issue de l'objet, elle peut être également comprise par les élèves comme l'envoi d'une copie de l'objet selon un raisonnement en « image voyageuse ».

produits ou qui les mettent en œuvre, ils ne sont que des énoncés, c'est-à-dire des traces écrites sur une page, ou des phrases récitées. L'important dans cette affaire n'est pas tant l'énoncé des contenus mais la pensée qui le sous-tend⁶⁷.

Ainsi que nous l'avons développé, l'explication rationnelle du mécanisme optique de la vision est le résultat d'une rupture épistémologique, d'un saut conceptuel. Cette donnée épistémologique nous paraît essentielle. Elle conditionnera l'élaboration d'un outil d'enseignement à forte composante transmissive. Dans le cas d'un saut conceptuel, c'est le cheminement intellectuel historique qui sera le fil conducteur de notre stratégie pédagogique.

Par conséquent, il ne s'agira pas de superposer une analyse historique à une analyse didactique, mais bien de proposer une transposition de l'histoire de l'optique, ou plus précisément une transposition des résolutions conceptuelles des difficultés de celle-ci (celle notamment qui consiste à faire de la lumière le *stimulus* de la vue) afin d'affronter les difficultés didactiques que nous aurons identifiées. Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible d'aménager un parcours cognitif qui s'appuie sur la genèse historique des théories de la vision, autrement dit de transposer un cheminement historique à un processus individuel d'acquisition des connaissances. Il s'agira d'une part de préciser la genèse historique sur laquelle nous entendons fonder notre recherche, et d'autre part de trouver un support didactique utilisable en classe dans lequel l'histoire des théories de la vision puisse s'exprimer.

5. Plan

Ainsi que nous l'avons souligné, l'enseignement du mécanisme de la vision risque de se heurter à deux difficultés majeures : la complexité intrinsèque au savoir à enseigner (nous en avons parlé plus haut), et les représentations des élèves à propos de la lumière et de son rôle dans la vision. Celles-ci ont fait l'objet de nombreuses études, mais nous avons été surprise de constater que les programmes scolaires faisaient état de différences importantes entre les idées des élèves de l'école élémentaire et celles des élèves de collège, alors que nous pensons, au contraire que celles-ci sont proches. En outre, comme nous le disions, nous doutons que les élèves imaginent qu'ils voient parce que leurs yeux émettent de la lumière.

⁶⁷ Lemeignan G. et Weil-Barais A. *Construire des concepts en physique*, Hachette éducation, Paris, 1993, p.16.

C'est pour éclaircir cette question que nous consacrerons la première partie de notre travail à l'analyse des raisonnements des élèves à propos de la vision. Nous nous intéresserons aux raisonnements d'élèves de grande section de maternelle (première année de cycle II de l'école élémentaire), et de quatrième avant enseignement d'optique. Nous entendons mettre à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle les idées des élèves à propos de la vision évoluent peu entre 5 et 13 ans, et qu'elles obéissent à des logiques de fonctionnement assez proches qu'il s'agira de caractériser. Cette analyse n'aura pas pour unique objectif de déterminer le rôle joué par la lumière dans les raisonnements des élèves mais d'avoir une vue plus large de leurs représentations à propos de la vision. Elle viendra compléter les études réalisées auparavant par d'autres chercheurs. Ces raisonnements constitueront le point de départ du parcours cognitif dont l'histoire des théories de la vision sera l'inspirateur.

Celle-ci sera l'objet de notre deuxième partie. Nous présenterons une histoire des théories de la vision sur une période allant du 5^e siècle avant JC au 17^e siècle après. Une reconstruction rationnelle de l'histoire nous permettra d'extraire les éléments ayant participé à l'émergence rationnelle des théories de la vision, à savoir d'une part la construction de l'idée de lumière comme agent spécifique de la vue, et d'autre part l'adoption d'un raisonnement quantitatif. Ces éléments constitueront l'armature conceptuelle d'un support didactique visant à accompagner l'élève dans l'acquisition du mécanisme optique de la vision.

Et c'est précisément sur ce point que portera notre troisième partie : l'élaboration d'un support d'enseignement dans lequel l'histoire des théories de la vision puisse se manifester. En effet, nous pensons que la mise en scène d'une controverse historique constitue un outil d'apprentissage performant. Elle doit permettre à l'enseignant de tirer profit d'une possible identification des élèves aux Anciens, de créer une dynamique entre la controverse historique et celle qui risque de se créer au sein de la classe. Sur cette base, nous chercherons à construire un outil d'enseignement qui s'inspire du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée. Nous en proposerons une analyse didactique, puis nous en évaluerons l'impact cognitif. Nous espérons montrer que cet outil constitue un support d'apprentissage performant, et qu'il permette aux élèves de construire une explication du mécanisme optique de la vision rationnellement acceptable, en rupture avec leurs raisonnements intuitifs.

Parallèlement, nous espérons montrer en quoi la recherche en didactique des sciences peut proposer une autre lecture de l'histoire des sciences.

PREMIERE PARTIE : Analyse de raisonnements d'élèves à propos de la vision

Le chat ouvrit les yeux, le soleil y entra
Le chat ferma les yeux, le soleil y resta
Voilà pourquoi le soir, quand le chat se réveille,
J'aperçois dans le noir deux morceaux de soleil

Maurice Carême

1. Introduction

Nous ne pouvons pas envisager une séquence d'enseignement du mécanisme physique de la vision sans interroger préalablement les idées des élèves sur ce sujet. En effet, les théoriciens de l'apprentissage (didacticiens, cognitivistes, pédagogues) reconnaissent de façon unanime qu'un élève construit ses connaissances à partir de celles dont il dispose déjà, dans une constante dialectique très largement étudiée par les approches constructivistes⁶⁸. La prise en compte des représentations de l'élève, de ce « déjà-là », est un acte fondamental de l'enseignement scientifique. Même lorsqu'elles sont en désaccord profond avec les connaissances scientifiques, les représentations se révèlent d'une efficacité redoutable dans la résolution d'un certain nombre de problèmes. Et il est intéressant de noter qu'elles ne diffèrent pas tellement d'un individu à l'autre, si bien qu'il existe de grandes tendances de raisonnement, communes à l'ensemble d'une population sur un sujet donné⁶⁹.

Les représentations et les modes de raisonnements communs se constituent en une structure de pensée opératoire souvent cohérente (ou au moins partiellement cohérente⁷⁰), sans qu'aucune négociation avec une connaissance nouvelle ne semble nécessaire. Pour reprendre une expression de Lévi-Strauss, les raisonnements de sens commun constituent un « ensemble

⁶⁸ Nous nous réclamons de ces approches. Nous préciserons notre position au début de la troisième partie de notre travail.

⁶⁹ Dans son ouvrage *Raisonner en physique, la part du sens commun*, Laurence Viennot propose une revue des grandes tendances de raisonnements mises en lumière par différents travaux de recherche didactique dans des domaines tels que la mécanique, l'électrocinétique, l'électrostatique, l'optique, etc. Viennot L. *Raisonner en physique, la part du sens commun*, De Boeck, 1996.

⁷⁰ Voir à ce sujet Viennot L. *Raisonner en physique, la part du sens commun*, Ibid.

structuré » qui permettent la résolution cohérente d'un certain nombre de problèmes⁷¹. Cette auto-suffisance se révèle être une des difficultés majeures de l'enseignement⁷². De nombreuses recherches ont montré que ces représentations résistent à l'enseignement au point qu'on les retrouve souvent inchangées au terme de la scolarité obligatoire, à l'entrée à l'université, et parfois au-delà, alors même qu'elles coexistent avec des connaissances scientifiques acceptées. Par conséquent, il est important, avant tout enseignement d'un sujet particulier, de connaître les idées des élèves sur ce sujet afin d'élaborer une stratégie didactique visant la déstabilisation, voire la réorganisation des structures cognitives en jeu afin de les rendre rationnellement opérationnelles.

L'analyse des recherches didactiques antérieures montre que les élèves ne parviennent pas à expliquer le mécanisme physique de la vision de façon satisfaisante, c'est-à-dire conformément au modèle présenté en introduction dans lequel la lumière issue d'une source est renvoyée par un objet vers l'œil d'un observateur. L'une des difficultés majeures des élèves liée à ce modèle est que le phénomène de diffusion n'est pas reconnu, et que la présence de lumière n'est associée qu'à ses effets sensibles (pour eux, la lumière est assimilée aux sources primaires, elle n'existe que dans les zones visibles d'éclairement et ne pénètre dans l'œil que lors des sensations d'éblouissement).

Nous avons souhaité nous intéresser, nous aussi, aux idées développées par des élèves afin de caractériser celles qui risquent de faire obstacle à l'enseignement du mécanisme physique de la vision selon le modèle que nous avons énoncé en introduction. En outre, nous pensons que les explications des enfants à propos de la vision présentent certaines similitudes avec celles des anciens. Or l'idée d'un rapprochement historico-psychogénétique nous semble non seulement légitime (en tout cas dans une certaine mesure, comme nous allons le montrer), mais également utile à la fois pour l'analyse historique, et pour l'élaboration d'une séquence

⁷¹ Voir Lévi-Strauss C. *La pensée sauvage*, Plon, Paris, 1962, 27-29.

⁷² Bachelard parle lui en termes « d'obstacles ». Voir Bachelard G. *La formation de l'esprit scientifique*, op. cit. Pour Jean-Louis Martinand, ces difficultés conditionnent les objectifs d'enseignement en termes « d'objectifs-obstacles » : « Il existe à un moment donné du cheminement éducatif, dans une activité donnée, un obstacle décisif, dont l'aspect dominant se situe dans une des grandes catégories d'objectifs, attitudes, méthodes, connaissances, langages et savoir-faire. Si cet obstacle peut être franchi, son aspect dominant sera pour nous un objectif possible 'intéressant' ». Martinand J.L. *Connaître et transformer la matière*, Peter Lang, Berne, 1986, 111-112.

d'enseignement visant la construction, par les élèves, d'une explication du mécanisme de la vision⁷³. Nous avons proposé en introduction que l'analyse didactique des raisonnements des enfants pouvait permettre une lecture alternative des idées des anciens à propos de la vision. De plus, en supposant que les modes de raisonnements des enfants soient proches de ceux des anciens, on peut imaginer et tenter d'évaluer l'idée que le cheminement historique ayant conduit à la « doctrine d'Alhazen » puisse servir de guide pour le processus cognitif des élèves⁷⁴.

2. Les raisonnements des élèves à propos de la lumière et de la vision : résultats des recherches antérieures

La littérature didactique foisonne de recherches sur les raisonnements des élèves en optique élémentaire⁷⁵. Dans ce cadre, les caractéristiques essentielles des idées des élèves font l'objet d'un consensus. En effet, les didacticiens, quelles que soient leur origine et leur population d'étude (en France ou ailleurs), décrivent des difficultés identiques et convergent souvent vers un ensemble caractérisé de recommandations à destination de la population enseignante. Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont intéressés plus spécifiquement aux idées des élèves à propos de la vision, et plus particulièrement au rôle supposé de la lumière dans le mécanisme de la vision⁷⁶. L'organigramme ci-dessous présente sous forme synthétique les résultats de ces travaux (voir Figure 12). Nous entendons dégager des travaux antérieurs des catégories de raisonnements des élèves à propos du mécanisme de la vision.

⁷³ Cette explication peut s'exprimer en ces termes : un objet peut être vu seulement lorsque de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil de l'observateur.

⁷⁴ La « doctrine d'Alhazen » est à la source du modèle de la vision que nous avons proposé en introduction à des fins d'enseignement. Voir également note précédente.

⁷⁵ Nous nous référons en particulier aux travaux de Feher et Rice, Fawaz, Viennot, Goldberg et McDermott, Tiberghien, Guesne, Kaminski, Galili.

⁷⁶ Voir entre autres Guesne (1977 et 1984), Jung (1981), Tiberghien (1983), Andersson et Kärqvist (1983), La Rosa et al. (1984), Bouwens (1987), Fawaz et Viennot (1986), Kaminski (1991), Osborne et al (1993), Mistrioti (2003), Delaye (2004).

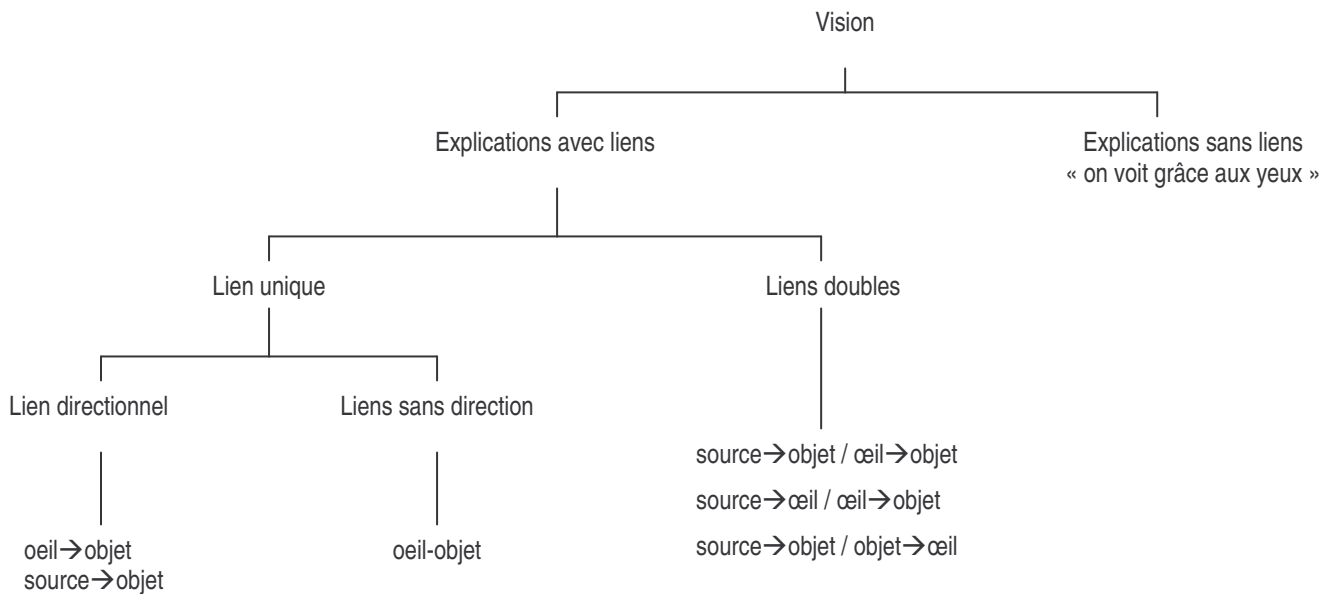


Figure 12 : Organigramme représentant les tendances de raisonnement des élèves à propos de la vision. L'expression « lien directionnel » fait référence aux raisonnements dans lesquels les élèves indiquent explicitement le sens du lien qui unit les éléments en jeu dans leur explication du mécanisme de la vision.

La première catégorie est celle dans laquelle les élèves interrogés ne font intervenir aucun lien entre l'œil et l'objet. La présence de l'œil seule suffit à expliquer que l'on voit les objets (Guesne 1984, Osborne et al. 1993). Dans une deuxième catégorie, nous regroupons les explications des élèves dans lesquelles un ou plusieurs liens sont explicités. Pour une majorité de ces élèves, **la vision est imaginée comme un processus dans lequel l'œil est actif** (lien directionnel unique $\text{oeil} \rightarrow \text{objet}$ ou lien double $\text{source} \rightarrow \text{objet} / \text{oeil} \rightarrow \text{objet}$, Guesne 1977) :

La vision est perçue comme un processus actif de la part de l'observateur, l'œil envoie des rayons qui reviennent vers la tête avec un message ou une image⁷⁷.

Remarquons que ces résultats confirment ceux obtenus par Piaget et Garcia qui en 1971 écrivaient :

Pour la presque unanimité des sujets, la vision comporte un passage dirigé de l'œil vers l'objet, et non pas l'inverse⁷⁸.

⁷⁷ Guesne E. Lumière et vision des objets, un exemple de représentations des phénomènes physiques pré-existants à l'enseignement, *GIREP*, G. Delacôte eds, Taylor and Francis, London, 1976.

⁷⁸ Piaget J. et Garcia R. *Les explication causales*, PUF, 1971.

Guesne précise que ces raisonnements sont essentiellement liés aux aspects psychiques de la vision, puisque lorsqu'on regarde un objet on a davantage le sentiment d'être actif que d'être un récepteur passif (certains élèves font d'ailleurs référence au cerveau dans leurs explications). A ce sujet, il est intéressant de noter que le langage courant véhicule une idée identique. Les expressions « jeter un œil », « lancer un regard », « avoir un regard perçant » attribuent à l'œil un rôle actif (Andersson et Kärrqvist 1983, Guesne 1984). Les élèves s'attachent donc uniquement à la dimension psychique de la vue (le regard dont nous avons parlé précédemment), et non à sa dimension physique qui demeure un objectif d'enseignement difficile. Guesne ajoute que ce mode de raisonnement n'est pas sans rappeler l'idée du « feu visuel » de Platon et de l'école pythagoricienne. Pourtant, cette association demeure inexploitée. Nous pensons, pour notre part, qu'il est possible de rapprocher certaines idées d'élèves de celles des Anciens. L'analyse des raisonnements que nous présenterons devrait nous permettre de réfléchir à la question des rapprochements entre ontogenèse et psychogenèse en optique afin d'explorer de façon plus approfondie la voie ouverte par Guesne. Pour cela, nous chercherons, le cas échéant, à caractériser la nature de ce qui est émis par l'œil.

Il est intéressant de remarquer que certains élèves associent l'œil à l'objet sans préciser pour autant le « sens » du lien qui les unit (lien sans direction œil-objet, Guesne 1984, Osborne et al. 1993).

Plus généralement, les élèves interrogés ne conçoivent pas qu'il puisse exister un médiateur indépendant entre l'œil et l'objet. En particulier, **l'œil n'est que très rarement perçu comme un récepteur de lumière** (Guesne 1984, Kaminski 1991). A ce sujet, Guesne a montré que les élèves associent la présence de lumière à sa manifestation sensible, or,

Le fait de voir un objet ne s'accompagne d'aucune sensation physique violente, on est rarement ébloui. Ne reconnaissant la lumière que lorsqu'elle provoque des effets fortement sensibles, les enfants ne pensent pas que l'œil puisse être récepteur de lumière⁷⁹.

Et lorsque la lumière est citée comme un élément nécessaire à la vision, elle n'intervient que pour éclairer les objets. De façon corrélatrice, **les élèves ne soupçonnent pas que les objets**

⁷⁹ Guesne E. Les conceptions des enfants sur la lumière, op. cit.

éclairés puissent renvoyer la lumière qu'ils reçoivent. A titre d'exemple, lorsque de la lumière est envoyée sur une feuille de papier, les élèves pensent qu'elle y reste (Tiberghien 1983, Guesne 1984). Il en est de même lorsqu'il s'agit d'expliquer la vision des couleurs. Dans cette situation la lumière ne fait que rarement le lien entre l'objet et l'œil (Chauvet 1994). Par ailleurs, même lorsque la lumière est reconnue comme étant le *stimulus* de la vue, son rôle dans le mécanisme de la vision n'est pas toujours conforme à celui du modèle du physicien. Dans ce cas, la lumière est perçue comme un « moyen de transport » d'une image formée dès le départ, c'est-à-dire à partir de l'objet. Cette idée est directement inspirée des raisonnements en « image voyageuse » où l'image, formée dès le départ est comprise comme une « copie de l'objet qui se promène » (Feher et Rice 1987, Golberg et McDermott 1987, Kaminski 1991, Viennot 1996, de Hosson 2002, Mistrioti 2003). En complément de ces recherches, il nous semble intéressant de regarder s'il existe, chez les élèves, une tendance à associer le renvoi de la lumière par les objets à l'intensité lumineuse avec laquelle ceux-ci sont éclairés.

Pour finir, signalons qu'il existe très peu de réponses où la vision est expliquée par les élèves comme une émission de lumière depuis l'œil vers l'objet. Dans ce cas, l'émission de lumière par l'œil est toujours précédée d'une réception de lumière par l'œil depuis la source lumineuse (liens doubles source → œil / œil → objet, Delaye 2004).

3. Analyse de raisonnements d'élèves de grande section de maternelle (1^{ère} année de cycle II)

Depuis une dizaine d'années, l'interprétation physique de la vision est un objectif d'enseignement des programmes de sciences physiques du collège, et également depuis peu de ceux de l'école primaire. Cette exigence institutionnelle mérite par conséquent que nous nous intéressions à l'état conceptuel des élèves (avant enseignement) sur ce sujet. En outre, dans la mesure où nous souhaitons explorer les idées des élèves et celles des Anciens à propos de la vision, il nous paraît nécessaire d'étudier les raisonnements pré-scientifiques, ceux des jeunes enfants en particulier. L'analyse qui va suivre nous permettra de découvrir comment les enfants de dernière année de maternelle, concernés par notre étude, expliquent la vision des objets qui les entourent. Notre recherche vient compléter celles réalisées précédemment dans la mesure où, d'une part, elle concerne des enfants dont les raisonnements à propos de la

vision n'ont, semble-t-il, pas encore été présentés dans la littérature didactique (de manière aussi détaillée), et d'autre part elle est centrée sur le mécanisme de la vision, et non exclusivement sur le rôle de la lumière dans la vision.

Etant donné que les enfants de grande section de maternelle n'écrivent pas, nous avons choisi de les interviewer individuellement pendant une demi-heure. Même si les résultats de nos entretiens ne valent que pour les élèves interviewés et n'ont pas de valeur statistique, cette modalité nous a permis d'obtenir des informations riches et détaillées, et de les inscrire dans des logiques de raisonnements communes à plusieurs enfants.

Nous avons réalisé 15 entretiens avec des enfants dont l'âge est compris entre 5 et 6 ans⁸⁰. Le choix de l'âge des enfants est motivé notamment par le fait que la littérature didactique ne semble pas faire état d'études détaillées concernant les raisonnements de jeunes enfants à propos de la vision. Les enfants interviewés n'ont jamais été confrontés scolairement au problème du mécanisme de la vision. Inspirée par les résultats des recherches antérieures, nous avons souhaité conduire notre entretien de façon à éclairer les questions suivantes :

Quelle est la fonction des yeux ? Sont-ils acteurs ? Comment agissent-ils ?

Quel est le rôle de la lumière ?

Existe-t-il un lien entre l'œil et la lumière ? Entre l'œil et l'objet ? Entre l'œil, la lumière et l'objet ?

La diffusion (le renvoi de la lumière par les objets) est-elle évoquée ?

Quels sont les éléments qui peuvent faire obstacle à l'évocation du phénomène de la diffusion ?

Ces questions s'intéressent, de manière détaillée, à l'interprétation de la vision. Elles se distinguent par exemple de celles proposées par Edith Guesne car elles ne portent pas sur les différents phénomènes optiques (ombres, images...) faisant intervenir la lumière mentionnée explicitement.

⁸⁰ Entretiens réalisés en janvier 2002 avec 15 enfants issus de deux classes de grande section de maternelle de l'école Louis Pasteur, Bailly (78).

Dans le contexte général de notre recherche, interroger les raisonnements des élèves à propos de la vision peut nous conduire à envisager des rapprochements entre ontogenèse et psychogenèse. Par conséquent, les questions ci-dessus sont construites en référence à ce que nous savons des idées des Anciens à propos de la vision (voir deuxième partie). Nous souhaitons que les réponses à ces questions nous aident à envisager une mise en perspective historico-psychogénétique à la fois raisonnable et utile. Cette orientation particulière semble se distinguer des motivations des recherches précédentes.

3.1. Présentation du guide d'entretien

Dans un premier temps, nous demanderons à l'enfant qu'il explique le mécanisme de la vision à partir d'un exemple simple. Il s'agit pour lui de répondre à la question suivante : « **peux-tu m'expliquer comment et pourquoi tu vois ce stylo ?** »

Nous ne nous attendons pas à ce que la lumière soit spontanément évoquée ; en revanche, les yeux le seront sans aucun doute. Dans ce cas, il sera nécessaire de faire préciser à l'enfant comment il explique le fonctionnement des yeux dans la vision : « **comment font tes yeux pour voir ?** »

A cette question, une réponse risque de s'imposer : « ils regardent ». Nous chercherons alors à savoir ce que signifie pour eux le verbe « regarder ». Il est également possible que les enfants évoquent l'idée d'une émission de « quelque chose » depuis l'œil ou depuis l'objet. Si tel est le cas, nous tenterons d'identifier la nature du « quelque chose » dont il sera éventuellement question. En particulier, nous essaierons de voir s'il est de la lumière et s'il présente des propriétés particulières. Nous prêterons une attention particulière au vocabulaire utilisé par les enfants pour nommer le « quelque chose », le cas échéant. Ensuite, nous chercherons à savoir si la lumière est nécessaire pour voir. Pour cela, nous prendrons l'exemple d'un objet placé dans une pièce totalement obscure.

Il s'agira pour les enfants de répondre à la question suivante : « **si je te mets dans une pièce toute noire, sans fenêtre, sans lampe, pourras-tu voir le stylo ?** »

Le noir absolu n'existe que de façon exceptionnelle dans la vie courante, et rares sont les enfants qui en ont fait l'expérience sensorielle. On peut donc s'attendre à ce que certains

enfants assimilent ce que nous sous-entendons par noir absolu, à l'obscurité relative de leur chambre à coucher, d'une nuit éclairée par les réverbères etc. Il ne sera guère étonnant de trouver des réponses positives à la question précédente. Encore faut-il que celles-ci soient nuancées par la présence d'un éclairage annexe explicité par l'enfant (la lumière du couloir, celle de la Lune, ou des lampadaires...). Ce qui serait surprenant, mais non moins intéressant, ce serait que l'enfant affirme qu'on pourra voir le stylo dans le noir absolu à cause de propriétés intrinsèques du stylo lui-même (une couleur claire, par exemple). Dans l'éventualité d'une réponse positive, on proposera à l'enfant de faire l'expérience dans une petite pièce obscure. A ce moment de l'entretien, l'enfant devrait avoir acquis la certitude que pour voir un objet, la lumière est nécessaire. Nous chercherons alors à comprendre comment la lumière est intégrée à une explication du mécanisme de la vision.

Nous aborderons cette question du rôle de la lumière par les questions suivantes : **« sans lumière on ne peut pas voir. Peux-tu m'expliquer à quoi sert la lumière ? D'où elle vient ? Comment fait-elle pour nous permettre de voir ? »**

La réponse attendue sera sans doute proche de : « la lumière sert à éclairer ». On pourra donc demander à l'enfant d'expliquer ce que signifie éclairer. Si l'enfant émet l'hypothèse que la lumière « va » sur l'objet, on lui demandera ce qu'elle devient ensuite, tout en sachant que l'enfant risque de répondre que la lumière « reste » sur l'objet. Nous lui poserons la même question s'il dit que la lumière va dans les yeux, et que c'est grâce à cela qu'on voit. Les études réalisées par Piaget ont montré que l'idée d'un déplacement de la lumière ne devient explicite qu'à partir de 11 ans environ⁸¹. *A priori* donc, les enfants concernés par notre recherche ne devraient pas envisager que la lumière puisse se propager à partir de la source qui la crée. Pour Piaget, cela est dû au fait qu'au stade I (entre 4 et 6 ans), l'enfant est lui-même source de causalité par ses propres actions. Autrement dit, les liens de causalité ne sont reconnus par les jeunes enfants que lorsqu'ils agissent sur les objets, et non lorsque les objets agissent les uns sur les autres, indépendamment des actions des enfants. A ce stade, il y a « indifférenciation de l'opération et du causal »⁸².

⁸¹ Voir Piaget J. et Garcia J. *Les explications causales*, op. cit. 102-105.

⁸² Ibid. p. 125.

Nous tenterons ensuite de savoir si les enfants envisagent le renvoi de la lumière par les objets éclairés. A cette fin, nous disposons d'une lampe puissante que nous dirigeons vers un mur blanc. Nous plaçons l'enfant face au mur, et nous lui demandons, avant d'allumer la lampe, s'il pense qu'il recevra de la lumière dans ses yeux, et pourquoi. L'objectif de cette question assistée par l'expérience, est de définir à partir de quel moment les enfants reconnaissent que de la lumière issue du mur parvient jusqu'à leurs yeux, et surtout à partir de quand ils pensent que celle-ci « reste » sur le mur. Les investigations antérieures nous laissent penser que les enfants n'admettront que de la lumière arrivera dans leurs yeux que lorsqu'ils seront éblouis, et que, lorsqu'ils ne le seront plus, c'est que la lumière « restera » sur le mur. Si tel est le cas, nous leur demanderons s'ils voient le mur parce que de la lumière venant du mur entre dans leurs yeux. Et nous étendrons notre question aux objets ordinaires dont nous disposerons : **« Est-ce que tu vois ce stylo parce qu'il envoie de la lumière dans tes yeux ? ».**

Pour terminer l'entretien, nous demanderons à l'enfant de représenter par un dessin la façon dont il explique la vision. S'il ne parvient pas spontanément à dessiner quoi que soit (la question est, en effet, très difficile), nous lui proposerons de dessiner un personnage, une fleur, le Soleil, et de représenter par des flèches comment tout cela fonctionne, de façon à ce que le personnage voie la fleur. Cette étape nous permettra de caractériser les liens qui unissent (ou non) les différents éléments nécessaires à la vision, et de faire une revue du vocabulaire utilisé. Enfin, nous proposerons à l'enfant une explication du mécanisme de la vision conforme à celle présentée en introduction, et nous lui demanderons son avis : **« En fait, si tu vois ce stylo c'est parce que de la lumière arrive sur lui, et qu'il la renvoie dans tes yeux. Que penses-tu de cela ? »**⁸³

Nous espérons voir ainsi si une telle explication est accessible aux enfants de 5-6 ans, et surtout quels éléments s'opposent à l'acceptation de cette explication.

⁸³ Pour cette technique d'entretiens « micro-enseignement » accompagnés d'une demande de l'avis de l'enfant, voir W. Jung, Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties, op. cit.

3.2. Analyse

Avant toute chose, nous tenons à signaler que nous avons été parfois très surprise (voire décontenancée) par certaines réactions tout à fait inattendues. Dans quelques cas, nous n'avons pas pu respecter scrupuleusement le plan d'interrogation que nous nous étions fixé. Certaines réponses méritaient en effet une attention supplémentaire, soit parce qu'elles nous semblaient peu claires, soit parce qu'elles étaient le signe de raisonnements que nous n'avions pas anticipés. Par conséquent, l'analyse que nous proposons maintenant dépassera largement les limites initiales de notre protocole.

Chacun des paragraphes suivants correspond à un élément d'une grille d'analyse commandée par les questions à partir desquelles nous avons construit notre entretien (voir plus haut). Il s'agit tout d'abord d'analyser la façon dont les enfants envisagent le rôle des yeux : sont-ils cités explicitement ? Sont-ils actifs ? Envoient-ils « quelque chose », si oui, quelle est la nature de ce « quelque chose » ? Ensuite, nous chercherons à caractériser le rôle que les enfants attribuent à la lumière : sert-elle uniquement à éclairer ou joue-t-elle un autre rôle ? Est-elle envoyée par les yeux ? Est-elle renvoyée par les objets ? Entre-t-elle dans l'œil ?

3.2.1. Le rôle des yeux : « je vois parce que j'ai des yeux »

Conformément à nos attentes, les enfants expliquent la vision en invoquant essentiellement leurs yeux, comme le montre cet extrait d'entretien réalisé avec Nolwenn :

Prof ⁸⁴	Est-ce que tu pourrais m'expliquer // Tu vois ce stylo là ?
Nolw	Oui.
Prof	Est-ce que tu peux m'expliquer comment ou pourquoi est-ce que tu le vois ?
Nolw	Parce que j'ai des yeux.
Prof	Parce que tu as des yeux // C'est tout ?
Nolw	Oui.

Mais ce que nous pouvons d'ores et déjà souligner, c'est que, si on ne leur demande pas explicitement de préciser un éventuel « sens » pour la vue, deux enfants seulement (sur les 15 interrogés) expliquent spontanément la vision par quelque chose qui sort de l'œil. Pour les autres enfants, le rôle des yeux est limité à l'action de « regarder » :

⁸⁴ Dans toutes les retranscriptions d'entretiens Prof désigne nous-même, le signe / indique un court silence, le signe // renvoie à un silence beaucoup plus long.

Prof Je voudrais que tu m'expliques comment tu fais pour voir le feutre, là.
 Clara Avec mes yeux.
 Prof Avec tes yeux. Qu'est-ce qu'ils font tes yeux ?
 Clara **Ils regardent.**

Comme nous le rappelions précédemment, opération et causalité sont, selon Piaget, intrinsèquement liées pendant toute la durée du premier stade de développement. Or, pour voir un objet, il est nécessaire de tourner la tête. Et c'est l'unique opération que l'enfant ait à effectuer. En d'autres termes, la cause de la vision, c'est le regard, car la seule opération identifiée par l'enfant pour que la vision s'opère, c'est de tourner la tête vers l'objet et de le regarder. Mais il ne s'agirait pas de considérer cette réponse comme non-satisfaisante : cette explication fait bien partie intégrante du mécanisme de la vision, puisque le regard délimite la partie visible de l'espace. Si le regard est un élément constitutif de l'espace psychique du mécanisme de la vision, il est à lui seul insuffisant pour expliquer ce mécanisme.

Olivier évoque lui-aussi le « regard », tout en en précisant le sens :

Prof Je pose ce stylo devant toi et je voudrais que tu m'expliques comment tu vois le stylo qui est là.
 Olivier Avec mes yeux.
 Prof Avec tes yeux. Qu'est-ce qu'ils font tes yeux ?
 Olivier Ils le regardent.
 Prof Ça veut dire quoi ils le regardent ?
 Olivier Ça veut dire que je le vois. [*Olivier fait un geste avec sa main depuis son œil vers le stylo.*]
 Prof Que tu le vois. Tu as fait un geste, qu'est-ce que ça veut dire, ce geste ?
 Olivier **Que mes yeux ils font comme ça** [*vers le stylo*], **c'est mes yeux qui regardent.**
 Prof Il y a quelque chose qui sort de tes yeux ?
 Olivier Non.

Et ce qui est surprenant, c'est que tout en évoquant un « sens » pour le regard (depuis les yeux, vers le stylo), Olivier refuse l'idée que « quelque chose » puisse sortir de ses yeux, tout comme Nolwenn :

Prof : Et tes yeux, ils font quoi ?
 Nolw : Ben, les yeux ça sert pour regarder.
 Prof : Ils envoient quelque chose ?
 Nolw : **Ils envoient rien du tout.** C'est juste pour regarder, les yeux.

On peut supposer que la vision est considérée par les enfants simplement comme une action à distance, sans qu'aucune transmission ou sans qu'aucun intermédiaire entre l'œil et l'objet ne soit nécessaire.

3.2.2. Le rôle des yeux : « je vois parce que mes yeux envoient quelque chose »

En fait, à ce stade de l'entretien, très peu d'enfants (2 sur 15) expliquent spontanément la vision par l'envoi de « quelque chose » qui sort des yeux.

- Prof Marion, j'aimerais que tu m'expliques comment on fait pour voir.
 Marion On a des yeux.
 Prof Oui.
 Marion Et puis // les yeux ils ont / des // **ils ont de la lumière** et puis comme ça, ça leur permet de voir (...). La lumière, elle vient comme ça. [*Marion indique avec son doigt le sens de la lumière, depuis la fenêtre de la classe, jusque dans ses yeux.*]
 Prof Et ensuite ?
 Marion Ensuite, alors après ça nous permet de voir.
 Prof Les yeux font quoi quand ils reçoivent de la lumière ?
 Marion Après // mais ça s'arrête pas de la lumière qui vient dans nos yeux.
 Prof Ça ne s'arrête pas là ?
 Marion Oui.
 Prof Alors tu m'expliques ?
 Marion Ben, quand la lumière vient dans nos yeux, la première fois, après elle vient toujours/ sauf qu'on ferme les yeux, elle traverse les paupières (...). Après, quand // quand c'est utilisé après elle part.
 Prof Elle part des yeux ?
 Marion Oui, **elle rentre et après elle part.**
 Prof Elle part vers où ?
 Marion Vers là où // Elle part à l'endroit, là où on pose nos yeux.

Marion fait spontanément appel à la lumière lorsqu'elle explique la vision. Et il est intéressant de remarquer qu'elle la considère comme une entité qui se propage. Pour Marion, les yeux renvoient la lumière qu'ils reçoivent dans la direction du regard, « là où on pose nos yeux ». Stanislas évoque lui aussi l'idée que les yeux émettent « quelque chose » après avoir reçu de la lumière. Mais ce « quelque chose » n'est pas de la lumière :

- Prof : Stanislas, peux-tu m'expliquer comment tu fais pour voir ce stylo ?
 Stan : C'est avec mes yeux.
 Prof : Tu peux m'expliquer un peu plus ?
 Stan : En fait, il y a la lumière aussi.
 Prof : Et qu'est-ce qu'elle fait cette lumière ?
 Stan : **La lumière, elle rentre dans les yeux // et ça / ça permet aux yeux d'envoyer un truc // de l'électricité peut-être, vers les choses // et après / après ça prend la forme, la couleur, et comme ça on sait ce que c'est.**

Là encore, on trouve dans cette explication enfantine l'idée d'une propagation de la lumière, ainsi que celle d'une émission depuis l'œil précédée d'une entrée de lumière dans l'œil. Stanislas accompagne sa réponse du dessin ci-dessous (Figure 13).

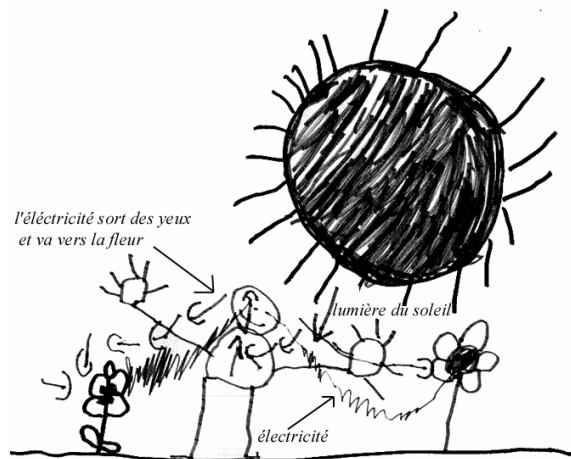


Figure 13 : Dessin illustrant la réponse de Stanislas. Parce que Stanislas ne sait pas encore écrire, nous avons pris la liberté de légender son dessin en respectant fidèlement ses propres commentaires.

Pour ces enfants, la lumière est dotée d'un mouvement (spontanément représenté par les flèches sur le dessin de Stanislas, et sur celui de Marion voir Figure 14 plus loin) qui devient la clé de voûte de leurs raisonnements : les yeux font « leur réserve » de lumière et renvoient quelque chose (qui n'est pas forcément de la lumière) vers les objets.

3.2.3. Nature du « quelque chose » qui sort de l'œil : Voir c'est « toucher » ?

Dans le cas de Stanislas, le « quelque chose » qui sort de l'œil n'est pas de la lumière, mais une entité quasi-matérielle qui semble posséder des propriétés tactiles : « **ça prend** la forme, la couleur, et comme ça, on sait ce que sait ». On trouvera une idée analogue dans les explications de Geoffroy.

[La réponse spontanée de Geoffroy est très succincte : « si on voit c'est grâce aux yeux ». En revanche, lorsqu'on lui demande de préciser, avec l'aide d'un dessin (voir Figure 17), les rôles respectifs de la lumière et des yeux dans la vision, Geoffroy devient beaucoup plus proluxe] :

- Prof : Donc tu penses finalement que la lumière c'est important pour voir. Tu peux m'expliquer ce qui se passe ? Tu peux faire un dessin, avec ce qui est important pour voir.
- Geof : Pour voir quoi ?
- Prof : Ben je sais pas moi, une fleur par exemple.
- Geof : Le Soleil il éclaire la fleur, et le bonhomme, là, il envoie des trucs, **des rayons de voit**, et ça lui permet de voir la fleur.
- Prof : Comment ça, ça lui permet de voir ?
- Geof : Les rayons de voit, tu vois, c'est // ça va là, sur la fleur, ça touche la fleur. C'est comme une main, ça touche la forme, la couleur.

Les yeux de Geoffroy envoient des rayons de « voit », qui, comme « l'électricité » de Stanislas, s'apparentent à une main. La vue semble fonctionner dans ces deux cas, comme une sorte de toucher, où l'entité émise par l'œil serait une espèce de pseudopode sensitif. En revanche, Marion ne nous dit rien de semblable lorsqu'elle évoque l'émission de lumière par l'œil. Pourtant, ces idées nous témoignent d'un processus de raisonnement tout à fait passionnant.

3.2.4. Voir : des évènements qui s'enchaînent dans le temps

Reprenons les propos de Marion :

Ben, quand la lumière vient dans nos yeux, la première fois, **après** elle vient toujours/ sauf qu'on ferme les yeux, elle traverse les paupières (...). **Après**, quand // quand s'est utilisé **après** elle part.

Cette phrase sous-tend l'idée suivante : dans une pièce sans lumière, on peut voir des objets non lumineux, à la condition que les yeux aient été préalablement mis en présence de lumière. Dans ce type d'explication nous nous trouvons face à des raisonnements de type séquentiel⁸⁵, que les enfants expriment de façon très explicite, avec un vocabulaire *ad hoc* : « avant », « après », autant de révélateurs d'un naturel qui, selon l'expression même de Laurence Viennot, se raconte des histoires, met en œuvre une succession chronologique d'évènements⁸⁶. D'ailleurs, pour Antoine (et peut-être pour beaucoup d'autres enfants), expliquer la vision c'est explicitement raconter une histoire :

Prof	Alors Antoine, peux-tu m'expliquer comment on fait pour voir ?
Antoine	Alors pour voir / tu vois / il faut avoir des yeux, si on n'en a pas, c'est sûr qu'on peut pas voir si on n'en a pas.
Prof	C'est le plus important ?
Antoine	Oui.
Prof	Tu peux m'expliquer ?
Antoine	Je connais pas trop des histoires.

Pourtant, le mécanisme de la vision d'un objet peut être expliqué sans que l'« histoire » soit, pour autant très longue. La célérité de la lumière, la vitesse de transmission des informations sensorielles justifient le fait que tout se passe (presque) en même temps : l'objet est éclairé, renvoie simultanément une partie de cette lumière dans toutes les directions, l'œil en reçoit, le

⁸⁵ Voir Closset J.L. *Le raisonnement séquentiel en électricité*, thèse, Université Paris 7, 1983, Rozier S. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*, thèse, Université Paris 7, 1988.

⁸⁶ Voir Viennot L. *Raisonnement en physique*, op. cit. 105-131.

système visuel analyse... Tout cela semble instantané. Penser la simultanéité n'est guère naturel, c'est la raison pour laquelle la causalité physique est pensée par la physique naïve comme essentiellement temporelle⁸⁷. Le « quelque chose » qui sort des yeux de certains enfants pour expliquer la vision ne fonctionne pas de façon autonome, il est dépendant d'un « avant » qui en est la cause. A ce titre, l'explication proposée par Marion pour justifier le fait que l'on ne voit pas dans une pièce obscure est tout à fait cohérente :

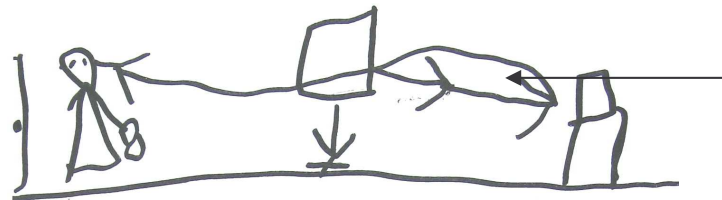
- Prof : Alors Marion, explique-moi. Si je te mets dans une pièce sans lampe et sans fenêtre, est-ce que tu vas pouvoir voir ?
- Marion : Si **avant** la lumière elle était allumée, elle peut venir dans nos yeux et **après** quand tu éteins elle repart.
- Prof : Mais si la lumière elle était pas allumée ?
- Marion : Quand c'est tout de suite // non, les yeux ils peuvent pas.
- Prof : Ça veut dire quoi, « les yeux ils peuvent pas » ?
- Marion : Ça veut dire // ça veut dire. Est-ce qu'il y a une porte ?
- Prof : Pourquoi ?
- Marion : Parce que tu vois, s'il y a une porte, il y a des petits traits de lumière, et la lumière elle vient par-là, par les petits traits.
- Prof : Et ?
- Marion : La lumière elle vient, elle peut venir dans nos yeux, et **après** elle repart.
- Prof : Et s'il n'y a pas de petits traits, pas de porte ?
- Marion : Et on peut pas allumer ?
- Prof : Non.
- Marion : On ne peut pas voir, parce que les yeux, tu vois / les yeux ils vont pas renvoyer de la lumière s'il n'y en a pas **avant** qui vient.

La réponse de Marion « on ne peut pas voir », est bien conforme à l'expérience, en revanche, l'explication qui accompagne cette réponse est bien éloignée du modèle physique de la vision : si l'on ne voit pas, c'est parce qu'aucune lumière n'a pénétré l'œil auparavant. La phrase de Marion « quand c'est tout de suite, non les yeux ils peuvent pas » signifie sans doute qu'un temps est nécessaire pour que les yeux renvoient la lumière reçue des « petits traits » de la porte. La structure temporelle-causale de ce type de raisonnement est tellement construite dans la tête des enfants, que leurs réponses viennent à bout des questions qui nous avaient semblé *a priori* déroutantes, ou, en tout cas, pouvant faire l'objet d'une remise en question. Or il n'en est rien. Ainsi, lorsque l'on propose un modèle de la vision proche de celui de la physique actuelle intégrant le phénomène de la diffusion à Marion, celle-ci ne semble pas déstabilisée. En effet, son propre modèle s'adapte assez facilement à cette nouvelle situation : si l'objet est le premier à recevoir de la lumière, alors il renverra la lumière dans les yeux de celui qui regarde :

⁸⁷ Ibid.

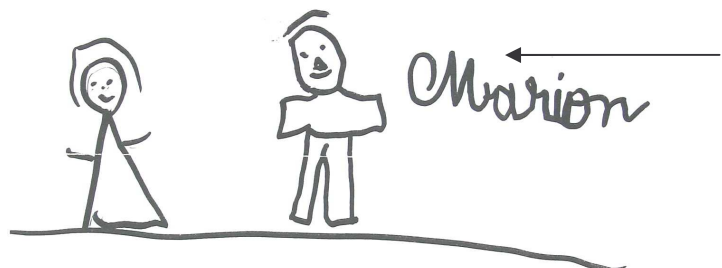
- Prof : Que penses-tu si je te dis qu'en fait on voit un stylo parce que les yeux reçoivent de la lumière qui vient du stylo ?
- Marion : Je pense que c'est vrai. Par exemple, s'il y a un verre sur une table, la lumière elle peut aller dans le verre. **Et alors après**, s'il y a une maman qui rentre des courses avec un sac, **alors après** la lumière elle va dans les yeux de la maman. Mais s'il y a quelqu'un déjà // si la lumière elle voit **d'abord** ce qui est près d'elle alors elle va dans ça **d'abord**.

Marion précise que la vision « dépend de la lumière », et que « ça marche pas toujours pareil ». Elle poursuit en expliquant que parfois la lumière « entre d'abord dans les yeux de celui qui regarde », et que parfois, elle « va d'abord sur les objets ». Tout dépend de ce que la lumière « voit » en premier. Et tant mieux pour la physique si la lumière « voit » l'objet avant la personne qui regarde cet objet (dessin n°1 de Marion, Figure 14).



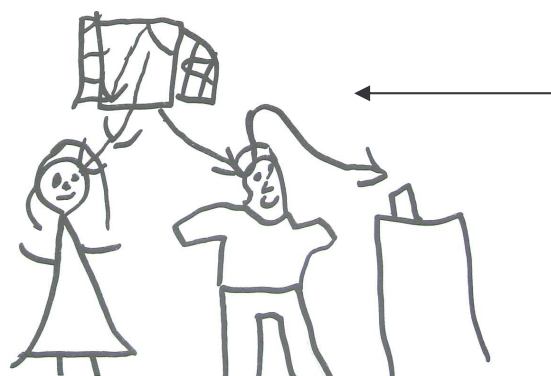
« La lumière va d'abord dans le verre, et après si une maman rentre des courses la lumière part du verre et va dans les yeux de la maman ».

Dessin n°1



« Mais si le papa et la maman ils sont déjà là alors la lumière elle fait pas pareil ».

Dessin n°2



« La lumière va d'abord dans les yeux des parents, et après, elle va dans le verre ».

Dessin n°3

Figure 14 : Dessins de Marion. Les légendes ont été ajoutées par nous-même, sous la dictée de Marion. Les trois dessins ont été réalisés successivement de haut en bas, sous forme de production séquentielle, tout en étant simultanément commentés par la suite par Marion.

L'explication de l'enfant peut merveilleusement faire illusion si l'on n'y prête pas une attention suffisante pour en comprendre la structure. Ainsi, lorsqu'elle est le protagoniste des explications naïves du mécanisme de la vision, cette lumière de la physique enfantine est dotée de propriétés autant inattendues qu'efficaces pour se plier aux exigences de la physique. On observe le même type de raisonnement chez Miléna lorsqu'il s'agit d'évoquer le renvoi de la lumière par les objets ordinairement éclairés.

Comme ses camarades, Miléna n'a pas d'explication préconçue de la vision, simplement elle exprime des idées sur le déplacement de la lumière (dont le rôle est, à l'exclusion de tout autre, d'éclairer), dans un souci de construire une suite chronologique d'événements :

[Miléna n'a pas spontanément parlé de lumière. En revanche, la nécessité de sa présence lui a semblé évidente lorsque nous avons évoqué le cas de la pièce obscure].

Prof : Qu'est-ce qu'elle fait la lumière quand tu regardes ce stylo ?

Miléna : Elle nous éclaire.

Prof : Tu peux m'expliquer ?

Miléna : C'est parce que la lumière elle fait toc **et après** elle va là *[Sur elle puis sur le stylo]*.

Prof : La lumière va sur toi, c'est pour cela que tu vois ?

Miléna : Oui mais **d'abord** elle va sur le stylo parce qu'il est plus près de la fenêtre.

Prof : Tout à l'heure, tu m'as dit que ça allait d'abord sur toi et après sur le stylo.

Miléna : C'est parce que j'avais pas vu que le stylo était là, près de la fenêtre. Mais si tu mets le stylo là, plus loin alors oui, ça ira comme ça, sur moi **et après** sur le stylo .

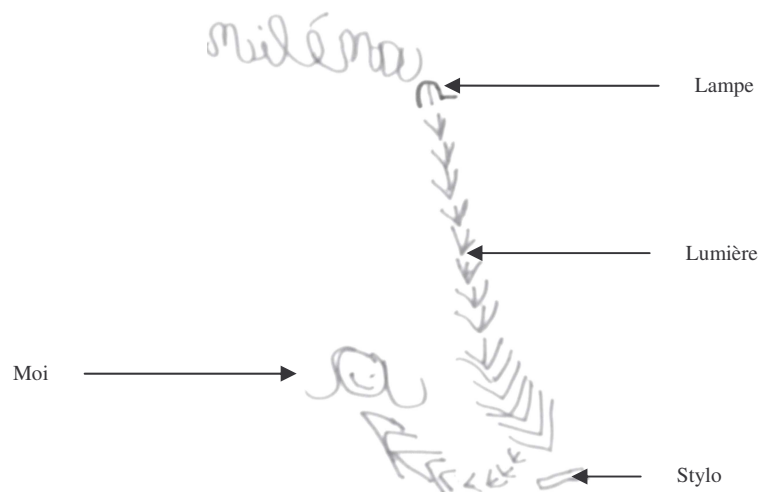


Figure 15 : Dessin de Miléna. Les flèches représentent la « lumière qui va vers le stylo et après sur moi, parce que le stylo est plus près de la lampe ».

Ici, Miléna n'évoque même pas l'idée que les yeux puissent recevoir de la lumière (elle dit « sur moi » et non « dans mes yeux »). Pour elle, la lumière et les yeux sont totalement dissociés, ce qui ne l'empêche pas d'affirmer que les objets renvoient la lumière. Là encore, une lecture un peu rapide aurait pu conduire à conclure que Miléna explique la vision de façon satisfaisante (voir Figure 15). Or, il semble qu'en réalité Miléna ne fasse pas de lien entre diffusion et vision, et considère la lumière comme « quelque chose » qui se propage et qui rebondit sur les objets, sans qu'une entrée dans l'œil soit nécessaire. Marion et Miléna attribuent à la lumière certaines propriétés (celle de se propager, de rebondir sur les objets, d'atteindre en premier des objets supposés plus proches des sources), en construisant des suites chronologiques d'évènements. Elles associent lumière et vision, mais ne posent pas l'entrée de lumière dans l'œil comme une condition nécessaire à la vue. Dans le cas où cette explication est avancée, elle n'est que fortuitement due aux positions respectives de l'objet, de la source (ou de la fenêtre), et de l'observateur.

En conclusion, d'une façon tout à fait générale, aucun des quinze enfants interrogés n'explique la vision par l'entrée de la lumière dans l'œil de l'observateur à partir des objets, sauf si, par hasard, l'objet est atteint par la lumière « avant ». Autrement dit, l'arrivée de lumière dans l'œil n'est pas une condition nécessaire à la vue, mais la conséquence fortuite de l'idée selon laquelle la lumière atteint les objets les uns après les autres, selon un ordre bien établi. Dans ce cas la lumière, lorsqu'elle pénètre dans les yeux, peut venir soit des objets préalablement éclairés, soit directement des sources. Deux enfants (sur les 15 participant aux entretiens) seulement expliquent que lorsque la lumière entre dans les yeux, alors ceux-ci envoient « quelque chose » vers les objets.

3.2.5. Le rôle des yeux : voir c'est recevoir « quelque chose » dans les yeux

Enfin, nous avons rencontré un cas où la vision est expliquée par l'entrée de « quelque chose » dans l'œil de l'observateur :

- Prof : Thibaud, tu peux m'expliquer pourquoi tu vois ce stylo ?
 Thib : C'est mes yeux.
 Prof : Tes yeux. Et qu'est-ce qu'ils font tes yeux ?
 Thib : C'est facile, c'est comme des petites particules toutes petites microscopiques qui se baladent, qui vont dans mes yeux, là, elles partent du stylo, elle rentrent dans mon œil et hop !

Nous n'avons pas de précision quant à la nature des « petites particules » dont il est question. Mais il est intéressant de remarquer que Thibaud ne parle pas d'image ou de reflet, ou encore de couleur qui se détacheraient de l'objet. Nous pouvons supposer que les « petites particules » constituent une entité qui, d'ores et déjà, joue le rôle d'intermédiaire entre l'objet et l'œil sans être nécessairement une réplique de l'objet lui-même. Notre échantillon ne nous permet pas de savoir si ce type de raisonnement est fréquent chez les enfants de 5 ans (ici Thibaud est le seul à nous parler des « petites particules microscopiques »), mais il est intéressant de noter qu'il existe parmi les enfants que nous avons interrogés une tendance de raisonnements que l'on pourrait qualifier de tendance intromissionniste, en référence au courant grec de l'intromission, qui, à l'inverse du courant extramissionniste, explique la vision par l'entrée dans l'œil de quelque chose issu de l'objet (nous ne nous attachons pas ici à la nature du « quelque chose » dont il est question, mais uniquement au « sens » dans lequel la vision est expliquée, vers ou depuis l'œil).

3.2.6. Le rôle de la lumière dans la vision : les objets ne renvoient pas de lumière sauf si...

Comme nous le disions précédemment, seuls deux enfants sur 15 font spontanément appel à la lumière lorsqu'on leur demande d'expliquer la vision. Pour les autres, le fait d'avoir des yeux semble suffisant. Pourtant, si on demande aux enfants de prévoir s'ils verront le stylo dans une pièce non éclairée, tous répondent de façon négative en précisant que la lumière est nécessaire à la vision :

Prof Par exemple si je te mets dans les toilettes des maîtresses, à côté, sans allumer la lumière, et que je ferme la porte, est ce que tu verras le stylo ?

Franck : Non.

Prof Pourquoi ?

Franck: Parce que **s'il y a pas de lumière, tu peux pas voir.**

Prof Oui mais tout à l'heure tu m'as dit qu'il n'y avait que les yeux qui étaient importants.

Franck : Oui mais c'est parce qu'il n'y a que les yeux qui voient.

Prof : Et la lumière ?

Franck : **La lumière, elle éclaire juste.**

Comme leurs aînés, les enfants de 5-6 ans considèrent que la lumière est indispensable pour voir, mais limitent son rôle à éclairer les objets (sauf dans le cas de Marion et de Stanislas). En outre, la lumière n'est évoquée qu'en réponse à une situation dans laquelle elle s'avère indispensable, et non pas de façon spontanée (sauf dans 2 cas sur 15).

A ce moment de l'entretien, on demande aux enfants de dessiner la façon dont ils imaginent la vision (en utilisant des flèches s'ils le souhaitent). Presque tous les enfants (à l'exception de Thibaud, Miléna et Marion), dessinent une flèche dirigée de l'observateur (ou de l'œil de l'observateur), vers l'objet (voir dessin de Franck, Figure 16). Cette flèche fait l'objet de dénominations diverses (lumière, regard, vue, yeux, rayons de « voit », électricité). Et ce qui nous semble fondamental, c'est que cette flèche ne désigne pas forcément « quelque chose » qui sort de l'œil, mais davantage un « sens » pour la vision, ce qui est différent (voir plus haut, réponse d'Olivier). Ainsi, lorsque les enfants ne disent pas explicitement que les yeux envoient « quelque chose », ou que « quelque chose » sort des yeux (réponse de Stanislas, de Marion et de Geoffroy), nous n'interpréterons pas ces flèches comme le mouvement d'entités sortant des yeux.

Tous les enfants dessinent une flèche partant de la source lumineuse (Soleil ou lampe) vers l'objet. Cette flèche figure le mouvement de la lumière de la source vers l'objet. Si l'on y regarde de plus près, l'objet à regarder constitue une zone de discontinuité du raisonnement, une limite entre un raisonnement perceptif centré sur l'observateur, et un raisonnement centré sur la lumière : « la lumière éclaire le stylo et après je vois le stylo » (Voir dessin de Franck, Figure 16).



Figure 16 : Dessin de Franck. La flèche qui part du Soleil désigne « la lumière qui éclaire ». La flèche issue du personnage représente « la vue ».

Cette structure discontinue du raisonnement s'applique également aux yeux, lorsque certains enfants (3 sur 15) les imaginent acteurs du processus de la vision : la nature de ce qu'ils envoient est, pour deux d'entre eux, différente de la nature de ce qu'ils reçoivent. Chez Stanislas, la lumière qui entre dans les yeux n'est pas isomorphe à l'électricité qui en sort

(voir Figure 13). Et il en de même pour celle de Geoffroy qui n'est pas de même nature que les rayons de « voit » qui sourdent des yeux (Figure 17).

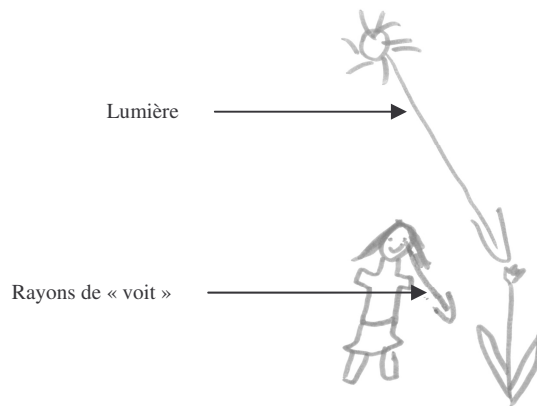


Figure 17 : Dessin de Geoffroy accompagné du commentaire suivant : « le Soleil il éclaire la fleur, et le bonhomme il envoie des trucs, des rayons de voit, et ça lui permet de voir la fleur ». Jusqu'à ce qu'on lui demande de représenter la vision, Geoffroy n'a pas dit que les yeux envoyait « quelque chose ». Ce n'est qu'au moment du dessin qu'il apporte cette précision.

Et mises à part Marion et Miléna qui disent que les yeux renvoient la lumière qu'ils reçoivent, les enfants qui expliquent la vision par l'émission de « quelque chose » depuis l'œil, ou simplement selon un sens $\text{oeil} \rightarrow \text{objet}$, ne considèrent pas leurs yeux comme des flambeaux⁸⁸. Par conséquent, ni l'objet, ni l'œil ne sont considérés par les enfants (à l'exception d'un seul) comme une zone de passage de la lumière, mais ils constituent plutôt une zone de discontinuité du raisonnement.

Dans une étude précédente, nous avons mis en évidence une tendance analogue du raisonnement des élèves de quatrième à propos de la formation des images optiques réelles⁸⁹. Dans ce contexte, la lentille joue le rôle d'une frontière entre deux idées entrant dans le même *corpus* explicatif, mais néanmoins distinctes dans les notions qu'elles mettent en jeu. Ainsi,

⁸⁸ Voir à ce sujet, Hosson (de) et Kaminski W, Les yeux des enfants sont-ils des « porte-lumière » ? *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, janvier 2002, 143-162. Précisons que nous n'avons pas demandé à Marion si la lumière de ces yeux était la même que celle du Soleil ou des lampes.

⁸⁹ Voir, Hosson (de), *La formation d'une image à travers une lentille convergente dans les programmes de 1992 de collège : éléments d'un bilan concernant les raisonnements des élèves*. Mémoire de tutorat, LDSP, Université Paris 7, 1998, p. 14 et p. 41.

nous avons pu montrer que pour un certain nombre d'élèves de collège l'explication est fondée sur la lumière avant la lentille, et sur l'image après la lentille. Nous pouvons citer pour mémoire la réponse d'un élève à qui l'on demande d'expliquer la formation d'une image grâce à une lentille convergente :

La bougie envoie sa lumière sur la lentille et la lentille projette une image sur le support⁹⁰

Même si de telles tendances de raisonnement étaient minoritaires dans le contexte de cette étude, (elles ne concernaient que 5% de la population, interrogée après l'enseignement d'optique au collège), nous pensons qu'elles sont un obstacle sous-estimé. Il est important de noter que notre investigation n'avait pas pour objet de dépister cette discontinuité, nous ne l'avons constatée qu'ultérieurement. Quoiqu'il en soit, nous pensons qu'il existe une tendance du raisonnement à opérer une rupture avant et après la lentille, comparable à celle que les enfants envisagent à la surface d'un objet à regarder. Dans la plupart des cas, l'objet n'est pas un lieu de passage pour la lumière, mais un lieu de rencontre entre deux protagonistes de natures totalement différentes. Et cette constatation concerne également l'explication proposée par Thibaud pour qui les « petites particules » qui partent de l'objet sont différentes de la lumière qui « arrive sur l'objet » :

[Spontanément, Thibaud ne parle pas de lumière. Après l'avoir fait réfléchir sur le cas de la pièce obscure, on lui demande de préciser le rôle de la lumière dans la vision].

- Prof : Tu m'as dit que la lumière aussi est importante pour voir. Tu peux m'expliquer comment ça se passe ? Qu'est-ce qu'elle fait cette lumière quand on voit ?
- Thib : Elle arrive là, sur le stylo.
- Prof : Et ?
- Thib : C'est comme j'ai dit. Les petites particules du stylo, elles vont dans l'œil. C'est à cause de la lumière.
- Prof : A cause de la lumière ?
- Thib : Oui, **la lumière elle arrive et les particules elles partent.**

La lumière éclaire et les yeux regardent vers les objets. Voilà résumé en peu de mots les raisonnements de 13 des 15 enfants de maternelle que nous avons interrogés. Cette explication n'est pas spontanée (spontanément, ces enfants ne parlent pas de lumière, mais uniquement des yeux), mais elle est systématique lorsque l'on place l'enfant dans une situation où il est amené à réaliser que la lumière est nécessaire (situation de la pièce obscure). Par ailleurs, rares sont les enfants qui pensent que les yeux envoient « quelque chose », et il

⁹⁰ Réponse d'un élève d'Aulnay sous Bois (93), Hosson (de), op. cit.

nous semble important de ne pas interpréter les flèches œil→objet comme la représentation d'entités sortant de l'œil (3 enfants seulement sur les 15 interrogés parlent des yeux qui « envoient » et 2 (sur les 3) le font de façon spontanée). De plus, cette entité n'est pas toujours de la lumière (au sens de ce qui éclaire).

3.2.7. Le rôle de la lumière dans la vision : « Quand la lumière entre dans l'œil, ça pique les yeux »

Un mur de la classe est éclairé par une lampe-torche très puissante. Nous plaçons l'enfant face au mur et nous lui demandons s'il pense être ébloui par le mur et pourquoi. Tous les enfants prévoient qu'ils ne seront pas éblouis tant que la lampe est dirigée vers le mur. Et spontanément, 13 enfants sur 15 enfant affirment que la lumière ne peut pas être renvoyée par le mur :

- Prof : Tu vois cette grosse lampe ?
 Fred : Oui.
 Prof : Cette lampe, je ne vais pas l'allumer vers tes yeux. Pourquoi à ton avis ?
 Fred : Parce que sinon, ça va faire mal aux yeux.
 Prof : Pourquoi ?
 Fred : Parce que la lumière, là, elle va rentrer dans mes yeux, et j'aurai mal.
 Prof : Donc je ne le ferai pas parce que je ne veux pas te faire mal aux yeux.
 Maintenant, si j'éclaire le mur avec cette lampe, et que tu regardes le mur, est-ce que ça va faire mal aux yeux ?
 Fred : Non.
 Prof : Pourquoi ?
 Fred : Parce que **la lumière, elle va sur le mur, pas dans mes yeux.**

On réalise donc l'expérience dans l'objectif de créer un conflit-cognitif⁹¹ :

- Prof : Tu t'approches, et tu regardes le mur [*nous allumons la lampe*].
 Fred : Ça pique les yeux.
 Prof : Ah ? Et pourtant tu m'as dit que tu n'aurais pas mal aux yeux. Qu'est-ce qui s'est passé ?
 Fred : Ça a éclairé beaucoup le mur.
 Prof : Quoi ?
 Fred : La lumière.
 Prof : Et pourquoi tu as eu mal aux yeux ?

⁹¹ Les différences entre les prédictions, ou les hypothèses des élèves et les observations, et/ou les vérifications etc. peuvent produire chez eux un état de déséquilibre appelé conflit cognitif. Lorsque l'élève se heurte à des données qui le conduisent parfois à rectifier ses prédictions, il peut revoir les associations, les liens qui l'ont conduit à formuler de telles prédictions, afin d'en proposer de nouvelles qui soient davantage conformes à aux observations. C'est ce que Piaget nomme « l'accommodation » : il s'agit pour les élèves d'ajuster leurs conceptions afin de les rendre compatibles avec l'expérimentation. L'enseignant qui adopte une pédagogie « constructiviste » peut se servir du conflit-cognitif pour engager ses élèves dans une démarche de réflexion et de recherche par un jeu d'essais et d'erreurs. Voir à ce sujet, Piaget J. Remarques psychologiques sur l'enseignement élémentaire des sciences naturelles (1949), *De la pédagogie*, Odile Jacob, 1998.

Fred : Parce que la lumière elle est allée dans mes yeux. D'abord sur le mur et après dans mes yeux, comme ça. [*Frédéric fait un geste indiquant un sens de déplacement de lumière lampe → mur → œil*].

Tous les enfants, sans exception, reconnaissent dans ces conditions que de la lumière provenant du mur entre dans leurs yeux. Cette reconnaissance est associée à l'éblouissement dont ils sont victimes, et auquel ils ne s'attendaient pas. En revanche, la plupart d'entre eux continuent de penser que la lumière du jour, même si elle arrive sur le mur, ne peut pas être renvoyée par celui-ci. Au contraire, pour Marion (pour qui l'idée de vision est associée à celle de propagation de la lumière soit vers l'œil, soit vers l'objet à regarder), le mur renvoie la lumière, et ce, quelle que soit l'intensité de l'éclairement :

Prof : Si j'éclaire le mur, qu'est ce qui va se passer ?
Marion : La lumière elle va aller d'abord dans le mur, et après dans nos yeux.
Prof : Mais pourtant tu es près de la fenêtre. Pourquoi elle va pas d'abord dans tes yeux ?
Marion : Ben, parce que mes yeux [*rires*], mes yeux ils sont pas derrière ma tête [*Marion est face au mur, dos à la fenêtre, entre le mur et la fenêtre*].
Prof : Et si j'éteins la lampe, tu verras toujours le mur ?
Marion : Oui.
Prof : Pourquoi ?
Marion : Parce que c'est pareil mais moins fort, c'est la lumière du Soleil, là, dehors. Elle vient sur le mur, et hop, dans mes yeux.

Mais globalement (pour 13 enfants sur 15), la lumière n'est pas systématiquement renvoyée par les objets éclairés :

[*Après l'évocation de la pièce obscure, Augustin pense que s'il voit le stylo dans la pièce, c'est parce que celui-ci est éclairé par la lumière du jour « qui entre par les fenêtres de la classe »*].

Prof : Est-ce que tu crois que la lumière du jour arrive sur le mur ?
August : Oui, un petit peu.
Prof : Un petit peu. Et est-ce qu'elle va dans tes yeux.
August : Non.
Prof : Pourquoi ?
August : Parce que ça éclaire un petit peu et pas beaucoup // et là, j'ai pas mal, la lumière elle rentre pas / elle rentre pas dans mes yeux, c'est pour ça.
Prof : Mais celle de la grosse lampe de tout à l'heure, elle allait dans tes yeux.
August : Parce que celle-là, elle est plus éclairée // tu vois, on voit le rond là, elle peut partir, que le jour, il est moins éclairé, il n'y a pas de rond, **ça reste sur le mur.**

Ainsi que nous l'avons déjà évoqué, pour les enfants, et d'une façon tout à fait générale, l'hypothèse que de la lumière entre dans les yeux n'est exprimée que dans le cas où un effet sensible serait perceptible. (Ou, comme nous l'avons vu, lorsque c'est chronologiquement logique, si par exemple l'objet est atteint d'abord par la lumière, avant l'œil). Cet effet sensible, cette douleur, dépend en outre, de l'intensité lumineuse. Autrement dit, l'arrivée de lumière dans l'œil n'est associée qu'à la gêne qu'elle provoque. Ce raisonnement interdit

pratiquement l'idée de réception de lumière dans l'œil s'il n'est pas constaté d'effet douloureux, ce qui, comme nous le rappelait Edith Guesne, est pourtant presque toujours le cas. D'ailleurs la lumière ainsi exclusivement définie par son pouvoir blessant, est même capable d'endommager les objets matériels autres que les yeux. Ainsi, on demande à Clara si elle aura mal aux yeux en regardant le mur éclairé par cette même lampe puissante ; question à laquelle elle répond : « Non, ça va faire mal au mur ». C'est une idée analogue qui conduit Geoffroy à craindre pour les fleurs qu'il est en train de dessiner :

Ensuite // les fleurs / le bonhomme, il tourne la tête vers le Soleil // je vais faire des interdits parce qu'il va être aveugle / bon, les fleurs c'est pas interdit de regarder la lumière, mais quand même, si elles le regardent trop, elles pourraient se faire très mal au miel qui est là⁹².

Ainsi que Guesne le soulignait, recevoir de la lumière dans les yeux entraîne pour les enfants, et de façon systématique, une douleur. Or, la vision ne s'accompagne en général d'aucun effet gênant. Par conséquent, on peut s'attendre à ce qu'il soit très difficile pour les enfants de reconnaître que s'ils voient, c'est que de la lumière entre dans leurs yeux.

Les enfants que nous avons interrogés sont unanimes sur le lien (ou le non-lien) entre diffusion et vision : Le renvoi de la lumière par les objets ordinaires n'est envisagé que si la lumière en question est très forte (dans ce cas d'ailleurs, elle blessera les yeux). Dans le cas contraire, la lumière est « faite prisonnière », en quelque sorte, du support qu'elle atteint :

Prof Et si je te dis que le Soleil envoie de la lumière sur la fleur, et que la fleur renvoie la lumière dans les yeux, qu'est-ce que tu penses de ça ?
 Antoine Elle pourrait pas faire ça, c'est sûr.
 Prof Pourquoi ?
 Antoine Ben parce que / parce qu'en fait et ben // la lumière **elle reste** sur la fleur.
 Prof Et elle ne peut pas repartir de la fleur ?
 Antoine Non, pas du tout.

Le ton d'Antoine est sans équivoque, il refuse purement et simplement l'explication selon laquelle un objet ordinaire renvoie la lumière qu'il reçoit. De même en est-il pour Camille, et pour tous les enfants à l'exception de Marion et de Miléna dont nous avons déjà parlé :

Prof Est-ce que le stylo est éclairé par la lumière des lampes ?
 Camille Oui.
 Prof : Comment tu le sais ?
 Camille Parce que je le vois.

⁹² Nous sommes là en présence d'une tendance anthropomorphique du raisonnement très largement étudié par le psychologue Henri Wallon. Voir Wallon H. *Les origines de la pensée chez l'enfant* (1945), PUF, 1989.

Prof Est-ce que tu crois que la lumière qui arrive sur le stylo, ensuite elle va dans tes yeux ?
Camille Non, elle **reste dans le stylo**.

En conclusion, pour les enfants que nous avons interrogés, **il n'existe pas de lien causal entre le fait de recevoir de la lumière depuis un mur, et voir le mur**⁹³. D'ailleurs, un mur est visible, même s'il ne fait pas mal au yeux. La diffusion n'est pas envisagée comme phénomène fondamental dans la vision des objets ordinaires, mais comme le résultat d'une propriété particulière, selon laquelle la lumière rebondit lorsqu'elle est très forte. Ce renvoi n'est constaté que par l'effet sensible que provoque la lumière sur les yeux à ce moment-là, mais il n'est pas intuitivement envisagé :

Prof : Est-ce que tu vois ce stylo parce qu'il renvoie de la lumière dans tes yeux ?
Olivier : Non.
Prof : Et si j'éclaire le stylo avec cette grosse lampe ?
Olivier : Là le stylo il renvoie de la lumière dans mes yeux.
Prof : Et c'est pour cela que tu le vois ?
Olivier : Non, pas obligé, c'est pas obligé que la lumière elle soit forte pour voir.

En effet, c'est parfois même assez peu recommandé, au risque d'un éblouissement interdisant toute vision. Il n'est donc pas nécessaire que la lumière soit forte pour voir, donc pas nécessaire non plus qu'elle pénètre dans l'œil depuis l'objet. Mais pour les enfants, la lumière semble avoir cette propriété de « rebondir » sur les objets uniquement lorsqu'elle est très forte, et d'éblouir (ou de gêner légèrement) l'œil qui se trouverait alors sur son chemin. Il semble que cette propriété induise des raisonnements matérialistes proches de ceux des projectiles, qui lancés fortement peuvent blesser au rebond. Ces considérations d'enfants n'expliquent nullement la vision. Elles relèvent plus d'un constat. Pour les enfants, que le mur renvoie ou non de la lumière, de toute façon il demeure visible s'il est éclairé. Signalons, là encore, que le mur éclairé constitue une limite au-delà de laquelle la lumière ne peut plus continuer son chemin : elle « reste » sur le mur. En revanche, cette discontinuité est effacée lorsque la lumière est trop forte.

⁹³ En revanche, il existe un lien causal entre être ébloui et recevoir de la lumière, et entre regarder un objet (c'est-à-dire tourner la tête vers l'objet) et voir l'objet.

3.2.8. Pour conclure

Les 15 entretiens que nous avons réalisés nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Spontanément. 13 enfants sur 15 enfants expliquent la vision uniquement en parlant de leurs yeux, sans aucune autre précision quant à leur rôle ou à leur fonctionnement. 2 enfants citent spontanément la lumière, et donnent quelques indications sur son rôle et son interaction avec les yeux et les objets. Ces 2 enfants expliquent la vision par quelque chose qui sort de l'œil. Pour les autres, il semble n'y avoir aucun mouvement, aucun intermédiaire entre l'œil et l'objet, et la nécessité de la lumière n'est évoquée que lorsqu'on leur demande s'ils peuvent voir dans le noir.

Concernant les dessins⁹⁴. Tous les enfant dessinent une flèche source→objet et appellent cette flèche « la lumière ». 12 enfants sur 15 représentent la vision par des flèches source→objet/œil→objet, deux enfants changent le sens des flèches (objet→œil ou œil→objet) selon l'ordre chronologique supposés des événements qu'ils mettent en scène (concernant l'interprétation « naïve » de la vision, ce type de raisonnement n'a semble-t-il pas encore été identifié), et un enfant utilise des flèches source→objet/objet→œil à l'exclusion de toute autre. Dans ce dernier cas, la flèche objet→œil désigne des « petites particules microscopiques ». Sur les 14 enfants ayant dessiné une flèche œil→objet, trois enfants expliquent la vision par l'envoi de quelque chose qui sort de l'œil. Dans deux cas sur trois, le quelque chose qui sort des yeux possède des propriétés tactiles (la mise en évidence de ces propriétés semble constituer une nouveauté), et surtout, il n'est pas de lumière. En revanche, pour les 11 autres, la flèche œil→objet ne fait qu'indiquer un « sens » pour la vue, mais ne semble pas désigner une entité matérielle qui sort de l'œil. En tout cas, les réponses de ces 11 enfants ne permettent pas de conclure qu'ils expliquent la vision par l'envoi de quelque chose depuis l'œil. Certaines même, permettent de conclure le contraire.

Concernant la diffusion. Deux enfants admettent que les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent. En fonction des positions respectives de la source, de l'objet et de l'observateur, ces deux enfants expliquent la vision soit par la chaîne source→objet→œil, soit par la chaîne source→œil→objet. Leur raisonnement s'appuie sur la représentation d'une succession chronologique d'événements illustrée par un langage dans

⁹⁴ Les enfants réalisent leurs dessins après avoir répondu à un certain nombre de questions, et notamment après avoir pris conscience de la nécessité de la lumière. La représentation à l'aide de flèches est une suggestion explicitement faite aux enfants par nous-même.

lequel on trouve de nombreux marqueurs temporels, « avant », « après », et même « et » (dont on peut douter qu'il indique ici une simultanéité). Les 13 autres enfants disent que la lumière reste sur les objets et qu'elle n'est renvoyée que lorsqu'elle est très forte. Elle peut alors pénétrer dans l'œil, mais ce n'est pas la raison qui explique que l'on voit les objets : quand on est ébloui l'on ne voit pas bien. Aucun enfant ne fait le lien entre voir et recevoir de la lumière dans l'œil.

4. Analyse de raisonnements d'élèves de 4^e

Dans la partie qui va suivre nous allons nous intéresser aux idées des élèves de 4^e à propos de la vision (avant enseignement). Ces élèves sont directement concernés par l'enseignement du mécanisme optique de la vision. Aussi il nous semble important d'étudier leur état conceptuel. Nous présenterons tout d'abord une étude de représentations réalisée à partir de questionnaires (voir questionnaire, Figure 18). Cette étude sera ensuite complétée par une analyse d'entretiens. Les questions que nous nous posons sont les suivantes :

Quelle est la fonction des yeux ? Sont-ils acteurs ? Comment agissent-ils ?

Quel est le rôle de la lumière ?

Existe-t-il un lien entre l'œil et la lumière ? Entre l'œil et l'objet ? Entre l'œil, la lumière et l'objet ?

La diffusion (le renvoi de la lumière par les objets) est-elle évoquée ?

Quels sont les éléments qui peuvent faire obstacle à l'évocation du phénomène de la diffusion ?

Ces questions sont identiques à celles qui animent notre investigation sur les explications proposées par de plus jeunes enfants. Nous souhaitons montrer, par ce biais, que les idées des élèves de quatrième (avant enseignement) sont proches de celles des plus petits. La mise en évidence de conceptions récurrentes, communes aux deux populations interrogées (les élèves de maternelle d'une part, ceux du collège d'autre part) devrait nous permettre de mesurer l'ampleur des difficultés sous-jacentes à l'enseignement du mécanisme optique de la vision tel qu'il est présenté dans les programmes scolaires des deux niveaux. Il s'agit, en outre, de caractériser les tendances de raisonnement des élèves à propos du rôle de la lumière et de celui des yeux dans l'interprétation de la vision. Par la spécificité de son objet (notre enquête

porte sur le mécanisme de la vision et non sur le rôle de la lumière dans les phénomènes optiques tels que la diffusion, la formation des ombres, ou celle des images optiques), notre investigation devrait compléter les résultats des recherches antérieures. En particulier, dans le cas où les élèves expliqueraient la vision par l'envoi de « quelque chose » par l'œil, nous nous intéresserons à la nature de ce « quelque chose », ce qui semble constituer une nouveauté.

Une fois encore, les réponses à ces questions devraient nous aider à réfléchir à l'opportunité d'un rapprochement entre les réponses des enfants et les idées des Anciens à propos de la vision (idées que nous détaillerons dans notre deuxième partie).


<p>Cécile de Hosson Collège Claude Debussy Aulnay sous Bois (93)</p>	<p>Classe de 4ème Questionnaire</p>
<p>Question n°1</p> <p>Dans une chambre sans lumière (sans fenêtre et sans lampe), est-il possible de voir un objet ? Justifie ta réponse.</p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 10px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 10px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 10px 0;"/>	
<p>Question n°2</p> <p>Explique le mécanisme de la vision, c'est-à-dire la façon dont on voit les objets qui nous entourent. Tu peux utiliser le dessin ci-dessous si tu le souhaites.</p> <div style="display: flex; align-items: flex-start; margin-top: 20px;"> <div style="flex: 1;"> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> </div> <div style="flex: 0.5; text-align: center; margin-left: 20px;">  </div> </div>	

Figure 18 : Questionnaire proposé à 227 élèves de quatrième, avant l'enseignement d'optique.

4.1. Présentation du questionnaire

Notre objectif est de caractériser la façon dont des élèves de 4^e, qui n'ont jamais reçu d'enseignement d'optique⁹⁵, expliquent la vision des objets qui les entourent. Le questionnaire a été présenté à 227 élèves de 4^e issus de deux collèges d'Aulnay-sous-Bois (l'un classé en Zone d'Education Prioritaire, et l'autre non), répartis en dix classes pour un total de six enseignants différents⁹⁶. Ce questionnaire est constitué de deux questions ouvertes. Nous tenons d'ores et déjà à préciser que l'homogénéité des réponses nous amène à ne pas tenir compte de l'origine (collège ZEP ou non-ZEP) des élèves interrogés.

La première question devrait nous permettre de savoir si les élèves disent que la lumière est indispensable pour voir. *A priori*, nous pensons que ce devrait majoritairement être le cas. En outre, nous nous attendons à ce que les élèves limitent le rôle de la lumière à celui « d'éclairer » (soit la chambre, soit l'objet), et qu'ils ne fassent allusion ni à la diffusion, ni à l'entrée dans l'œil de la lumière. Cette question n'a pas directement pour objet d'interroger les raisonnements des élèves à propos du mécanisme de la vision, mais plutôt les raisonnements à propos du rôle de la lumière dans la vision. Aussi, la réponse que nous pourrions attendre « on ne peut pas voir car pour voir un objet, il faut que celui-ci soit éclairé et qu'il renvoie la lumière dans l'œil » ne devrait pas (ou peu) être présente parmi les justifications des élèves.

Dans la deuxième question il est explicitement demandé aux élèves de proposer une explication du mécanisme de la vision. L'objet de cette question est de voir si les élèves envisagent la vision selon un modèle proche de celui du physicien. La réponse que nous pourrions attendre est du type : « de la lumière arrive sur la fleur, la fleur renvoie la lumière dans les yeux de la petite fille ». Cette réponse correspond à l'idée de chaîne décrite en introduction. Elle peut éventuellement s'accompagner d'un dessin proche de celui de la Figure 19, où les flèches représentent le trajet de la lumière :

⁹⁵ Précisons que s'il est exact que les élèves interrogés n'ont jamais reçu d'enseignement d'optique, il n'en demeure pas moins que le fonctionnement de la vision (et des sens en général), est au programme de Sciences de la Vie et de la Terre de la classe de 5^e. En particulier, les élèves ont appris en 5^e que la lumière est le *stimulus* de l'œil. Cela ne signifie par pour autant qu'ils aient fait le lien entre le fait que l'œil soit sensible à la lumière, et le mécanisme de la vision.

⁹⁶ 99 élèves (5 classes) viennent du collège Claude Debussy (classé ZEP), et 128 élèves (5 classes) viennent du collège du Parc (non classé ZEP).

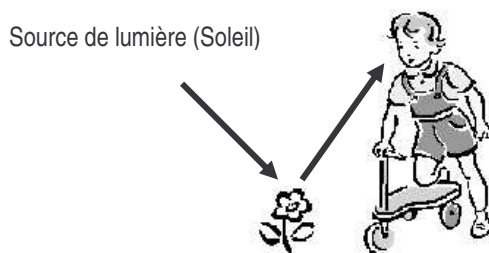


Figure 19 : Dessin attendu pour la réponse à la question n°2, à condition que les flèches désignent explicitement le trajet de la lumière.

Nous nous attendons cependant à ce que les élèves expliquent la vision par un mouvement allant de l'œil vers l'objet (symbolisé ou non par une flèche), et qu'éventuellement ils dessinent une source lumineuse avec une flèche indiquant que la lumière issue de cette source se dirige vers la fleur. Si les élèves dessinent des flèches (ou des lignes sans direction), nous prêterons une attention particulière à la fois au sens des flèches, et à ce qu'elles désignent. Les programmes de sciences physiques de 4^e encouragent l'enseignant à « corriger la représentation selon laquelle l'œil émet de la lumière » :

En ce qui concerne les sources de lumière, l'idée essentielle est de distinguer les sources primaires et secondaires, et d'identifier dans diverses situations le sens de propagation de la lumière. **Il convient dès le début de corriger la représentation selon laquelle l'œil émet de la lumière**⁹⁷.

Les élèves de 4^e n'ayant jamais fait d'optique expliqueraient donc la vision par une émission de lumière depuis l'œil ? Les représentations des plus petits à ce sujet nous donnent à penser que tel n'est pas le cas. Ainsi, le vocabulaire utilisé par les élèves devrait nous permettre de savoir s'ils disent que de la lumière sort de leurs yeux, comme le suggèrent les programmes, ou si le mouvement œil→objet est plus abstrait. En particulier, si un sens œil→objet est évoqué, nous pensons retrouver dans les explications des élèves de 4^e des termes proches de ceux utilisés par les enfants de 5 ans, tel que « regard », « vue » etc. Il s'agira ensuite de savoir si ce vocabulaire renvoie effectivement à la lumière, à une entité matérielle (semblable au pseudopode sensitif des plus petits), ou simplement à un sens pour la vue. Pour cela, nous chercherons dans les réponses des expressions du type « l'œil **envoie**... », ou encore, « quelque chose **sort de**... ».

⁹⁷ Programmes officiels de sciences physiques, classes de 5^e et 4^e, partie B : La Lumière, p.31.

4.2. Analyse des réponses au questionnaire

Question n°1 : Dans une chambre sans lumière (sans fenêtre et sans lampe), est-il possible de voir un objet ? Justifie ta réponse.

Le Tableau 3 rend compte de la répartition des réponses oui/non à la question 1. Contre toute attente, on constate qu'un nombre non négligeable d'élèves (38% des réponses) affirme qu'il est possible de voir un objet sans lumière.

OUI	86	38%
On peut voir un objet sans lumière		
NON	141	62%
On ne peut pas voir un objet sans lumière		
Total	N=227	100%

Tableau 3

Analyse des réponses OUI à la question n°1

Toutefois, il est important de souligner que certaines réponses OUI ne signifient pas forcément que les élèves pensent que la lumière est inutile. Certains (27 réponses OUI sur 86) précisent que l'on peut voir l'objet si celui-ci est lumineux par lui-même : « Oui, car l'objet peut être lumineux » (Salim). D'autres (12 réponses OUI sur 86) disent qu'à défaut de voir, on peut identifier l'objet grâce au toucher : « Oui, en le touchant, on peut reconnaître sa forme » (Anzanty) ou encore « Oui, parce que tu n'es pas obligé d'avoir la lumière, tu peux le toucher, le sentir » (Meryem). Par conséquent, ces 39 réponses OUI (27+12), sont à distinguer des 47 autres réponses OUI que nous analysons maintenant.

21% de la totalité des élèves interrogés (47 sur 227) disent que l'on peut voir sans lumière. Les raisons invoquées sont diverses. Pour 22 d'entre eux, les conditions de visibilité d'un objet dépendent de sa couleur : ainsi, les objets blancs ou très clairs sont-ils visibles dans le noir sans être éclairés :

Oui, on voit dans le noir, par exemple les objets blancs ou clairs on les voit, même quand il n'y a pas de lumière. (Yohan)

Ce raisonnement corrobore les résultats de l'étude menée il y a peu de temps par Véronique Delaye dans une classe de CM2. A cette même question, plus des deux tiers des élèves de la

classe répondent que l'on peut voir un objet dans le noir, à condition que celui-ci soit blanc⁹⁸. Mais ce qui est surprenant, c'est qu'aucun des élèves de maternelle que nous avons interrogés n'a dit qu'il pouvait voir dans une pièce obscure. En fait, comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, nous pensons que l'expérience quotidienne des élèves leur permet difficilement d'envisager une situation d'obscurité totale. 22 élèves indiquent qu'au bout d'un moment, les yeux s'habituent à l'obscurité : « Oui, on pourra voir l'objet car si on reste un bon moment dans le noir, nos yeux s'habituent » (Michel), et trois parlent de la Lune : « On peut voir parce que même s'il n'y a pas de lumière, il y a la Lune qui peut passer sous la porte » (Rachida). Cette affirmation est conforme à ce que les élèves vivent sans doute régulièrement, car il est probable que peu d'entre eux se soient retrouvés dans une pièce totalement isolée de la lumière extérieure. Souvenons-nous des questions insistantes de la petite Marion, « est-ce qu'il y a une porte, des petits traits de lumière ? » qui montraient bien qu'elle peinait à envisager le noir absolu.

En conclusion, 22 élèves sur 227 (soit environ 10% des élèves interrogés) disent clairement que l'on peut voir dans le noir sans que la présence de lumière soit nécessaire, à condition que les objets soient blancs ou très clairs. Et aucun élève ne dit qu'il peut voir car ses yeux émettent de la lumière. Le fait que les yeux n'envoient pas de lumière est d'ailleurs un argument utilisé par quelques élèves pour justifier le fait qu'on ne voit rien dans le noir. Le Tableau 4 donne une vue synthétique des différents types de réponses OUI obtenues à la question n°1.

⁹⁸ Delaye V. *L'explication du mécanisme de la vision des objets en cycle III : comment faire lorsqu'il n'y a pas d'expérience pour montrer ?* Mémoire professionnel, IUFM d'Alsace, 2004. A la question « penses-tu que l'on puisse voir un objet dans le noir ? » ; 2 élèves (sur 26) répondent de façon affirmative avec des réponses du type : « on s'habitue » et « les objets sont de couleur claire ». A la question « penses-tu que l'on puisse voir un objet blanc dans le noir ? », 18 élèves (sur 26) répondent OUI et 8 répondent NON.

Réponses du type :			
« Objet blanc ou de couleur claire »	22	10%	
Réponses du type :			
« Les yeux (ou la vue) s'habituent » ou	25	11%	
« La lune est présente »			
Réponses du type :			
« Toucher les objets permet de les identifier »	12	5%	
Réponses du type :			
« L'objet est lumineux par lui-même »	27	12%	
Total de réponse 'oui'	N=86	38%	

Ces réponses ne permettent pas de savoir si les élèves pensent réellement que l'on peut voir dans le noir absolu.

Tableau 4 : Répartition des réponses OUI à la question n°1

Analyse des réponses NON à la question n°1

62% des 227 élèves interrogés disent qu'il est impossible de voir un objet dans une chambre sans lumière. En général, les commentaires qui accompagnent les réponses ne font pas appel au rôle de la lumière. En effet, la très grande majorité des élèves ayant répondu NON à cette question (128 sur 141, soit 91% des élèves ayant répondu NON) affirme soit que « dans le noir on ne voit rien du tout » (Linda), soit que « sans lumière on ne peut pas voir » (Jean-Michel). Aucune de ces réponses ne donne d'indication, ni sur le fonctionnement de la vision, ni sur le rôle de la lumière dans la vision. Ces réponses ressemblent davantage à des explications tautologiques dans lesquelles la question est en fait reprise, comme dédoublée. Cette tendance tautologique de l'élève est une des caractéristiques du raisonnement de l'enfant. Elle se distingue de la tautologie courante qui consiste simplement à dire qu'une chaise est une chaise⁹⁹.

Parmi les 128 élèves ayant répondu NON à cette première question, 11 affirment que « le noir empêche de voir ». C'est un peu comme si le noir constituait un écran opaque. Le « noir » semble davantage apparenté à une matière qu'à un état consécutif à une absence de lumière. Au milieu du 20^e siècle, Henri Wallon s'est intéressé aux conceptions des enfants à propos du « noir » :

⁹⁹ Pour plus de détail sur la tautologie chez l'enfant, on pourra se référer aux travaux d'Henri Wallon. Voir en particulier, Wallon H. La Tautologie, *Les origines de la pensée chez l'enfant*, op.cit. 252-262.

L'impuissance de l'enfant à dépasser le donné concret semble avoir pour conséquence de lui faire attribuer une existence substantielle au 'noir' qui entrerait de la rue dans les maisons¹⁰⁰.

Et les réponses des 11 élèves pour lesquels le « noir empêche de voir » nous laissent penser que leurs idées sur « le noir » sont assez proches de celles mis en évidence par Wallon : le « noir » semble considéré comme une matière concrète.

Réponses du type : Interaction lumière-objet	5	2%	
Réponses du type : On ne voit rien dans le noir	128	56%	
Réponses du type : Les yeux n'envoient pas de lumière	7	3%	
Réponses du type : L'objet aurait dû envoyer de la lumière dans l'œil	1	1%	} ← Réponse attendue
Total de réponses 'non'	N=141	62%	

Tableau 5 : Répartition des réponses NON à la question n°1

Dans le Tableau 5 ci-dessus, nous avons regroupé les réponses qui nous semblaient relever d'un processus de raisonnement identique. A la lecture de ce tableau, nous pouvons constater qu'un seul élève justifie sa réponse de façon tout à fait conforme à nos attentes :

On ne verra pas l'objet parce que quand on voit, c'est parce qu'un objet renvoie de la lumière dans nos yeux. S'il n'y a pas de lumière, l'objet ne renvoie rien dans les yeux et donc on ne peut rien voir. (Anourak)

Cette réponse est étonnante de précision et de rigueur. Anourak détaille parfaitement le mécanisme de la vision, et en fait le socle de son raisonnement. D'autres élèves (5 au total) justifient leur réponse en explicitant le rôle de la lumière. Pour deux d'entre eux, la lumière sert à éclairer : « on ne verra rien car normalement la lumière éclaire les objets et c'est pour ça qu'on voit » (Estelle). Pour les trois autres, la lumière est indispensable pour « renvoyer », « réfléchir » ou « diffuser » l'image ou l'objet : « On ne verra pas l'objet, car il n'y a pas de lumière pour diffuser l'image » (Jérémie). Enfin, 1 élève (sur les 5 qui évoquent le rôle de la lumière) fait le lien entre l'œil et l'objet :

¹⁰⁰ Ibid. p. 265.

On ne voit pas car il n'y a pas de lumière, et la lumière ça réfléchit les objets à l'œil
(Nassim).

Pour terminer, signalons que 7 élèves (sur les 227 interrogés) expliquent qu'ils ne peuvent pas voir dans le noir car leurs yeux n'envoient pas de lumière : « On voit rien du tout parce qu'on a pas des yeux comme des phares » (Julien) ou encore, « On verra rien parce que nos yeux envoient pas de lumière » (Mohamed).

En conclusion, la majorité des élèves interrogés affirme qu'il est impossible de voir dans le noir, mais la plupart d'entre eux ne donne aucune indication quant au rôle de la lumière, et se contente finalement de ré-écrire l'énoncé : « on ne voit rien dans le noir ». Au regard des réponses obtenues, on peut penser que seuls 10% des 227 élèves interrogés considèrent qu'il est possible de voir dans le noir, sans lumière. Dans ce cas, les élèves attribuent aux objets clairs et/ou blancs la propriété d'être visibles dans le noir. Les autres élèves ayant répondu OUI à cette première question ne disent pas clairement que la lumière n'est pas nécessaire à la vue. Certains élèves précisent que l'objet peut être lumineux par lui-même, ou bien qu'il est possible de le « voir » en le touchant. Dans ce cas, le verbe « voir » semble être pris au sens des verbes « identifier » ou « reconnaître ». De plus, certaines explications sous-tendent l'idée que de la lumière est toujours présente, conformément à ce que les élèves vivent sans doute au quotidien. Et ce qui est important, c'est qu'aucun élève ne dit qu'il peut voir dans le noir parce que ses yeux envoient de la lumière. Bien au contraire, le fait que les yeux n'envoient pas de lumière est un argument avancé par quelques élèves afin de justifier le fait que l'on ne voit pas dans le noir. Enfin, très peu d'élèves explicitent le rôle de la lumière. Dans ce cas, la lumière est nécessaire à la vue soit parce qu'elle éclaire (l'objet ou la pièce), soit parce qu'elle permet à l'objet (ou à son image) de se refléter. Un élève seulement donne une réponse dans laquelle la vision d'un objet est expliquée de façon conforme à nos attentes. La Figure 20 présente une synthèse de la répartition de l'ensemble des réponses à la question n°1.

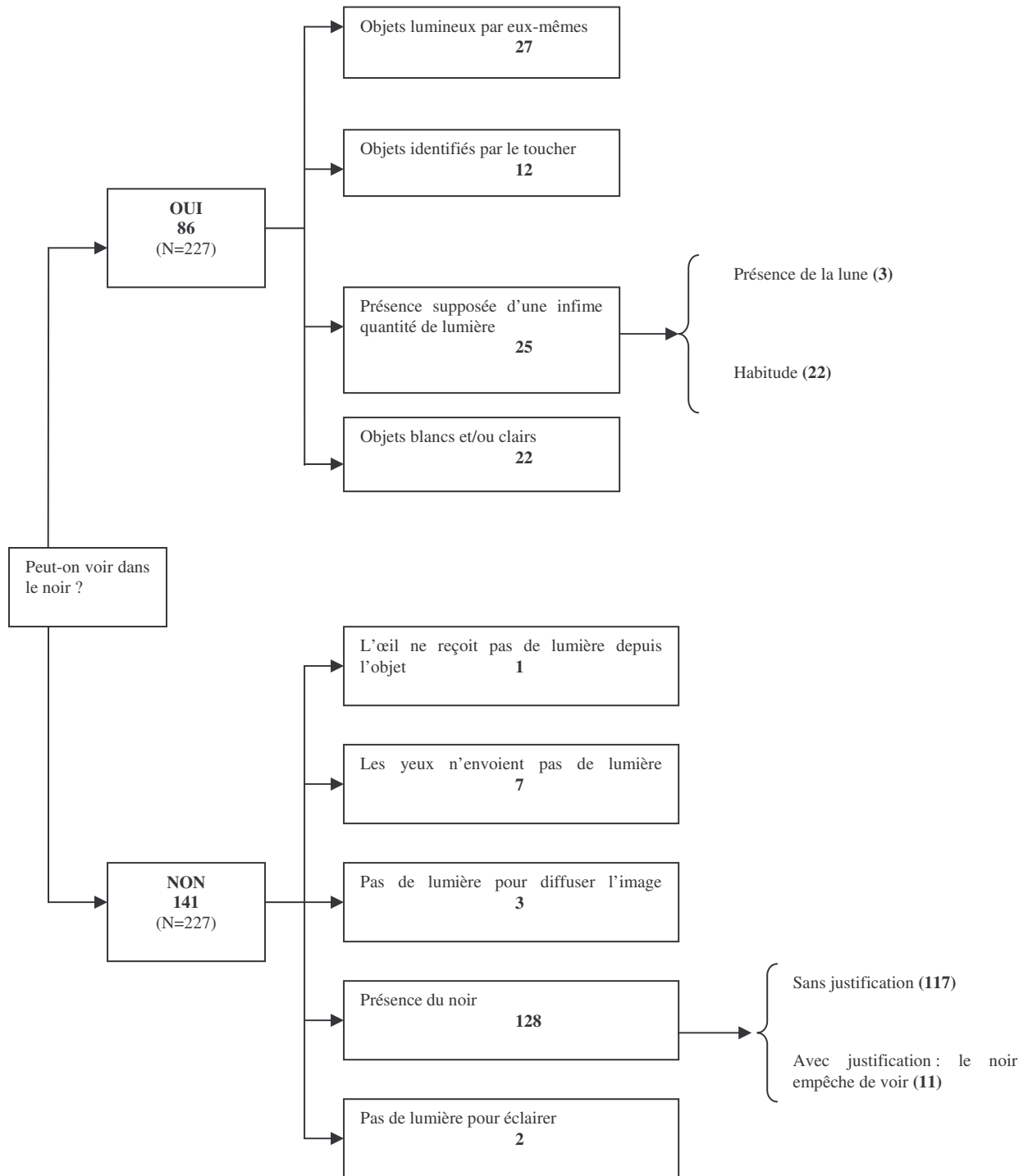


Figure 20 : Synthèse des réponses à la question n°1. Les nombres en gras indiquent le nombre d'élèves dont les réponses se rapprochent des catégories référencées.

Question n°2 : Explique le mécanisme de la vision, c'est-à-dire la façon dont on voit les objets qui nous entourent. Tu peux utiliser le dessin ci-dessous si tu le souhaites.

Un élève donne une réponse conforme à l'explication optique, c'est-à-dire en évoquant à la fois la réception de lumière dans l'œil depuis l'objet, et le phénomène de la diffusion (c'est d'ailleurs le même élève qui avait répondu de façon satisfaisante à la question n°1) :

« La petite fille voit la fleur parce que la fleur lui envoie de la lumière dans ses yeux. Cette lumière elle la reçoit du Soleil par exemple. » (Anourak).

La très grande majorité des élèves interrogés (204 sur 227, soit 90% des élèves) répond à cette question en utilisant le petit dessin. Dans ce cas, les explications proposées par ces 204 élèves sont illustrées par des flèches. Nous prêterons une attention particulière au « sens » des flèches et à ce qu'elles représentent.

Explication avec dessin	204	90%
Explication sans dessin	19	7%
Aucune réponse	4	3%
Total	N=227	100%

Tableau 6 : Les élèves expliquent-ils la vision avec ou sans dessin ?

19 élèves sur 227 (soit 7% des élèves interrogés) répondent à la question mais n'utilisent pas le dessin. Parmi ces 19 élèves, 14 donnent des réponses du type « L'œil envoie une vision » et 5 expliquent que « la fleur envoie son image vers la petite fille » (pas forcément vers ses yeux d'ailleurs). Enfin, 4 élèves ne répondent rien. Le Tableau 6 présente une synthèse de ces résultats. Signalons que 41 élèves (sur 227 soit 18% des élèves interrogés) ont ajouté une source lumineuse sur le dessin proposé¹⁰¹. Et ce qui est intéressant, c'est qu'aucun des élèves ayant répondu à la première question que l'on pouvait voir dans le noir n'a fait allusion à la lumière dans son explication du mécanisme de la vision (accompagnée ou non d'un dessin)¹⁰².

¹⁰¹ On peut supposer que ces élèves ont été influencés par la première question.

¹⁰² Nous parlons ici des élèves pour lesquels les objets blancs et/ou clairs sont visibles dans le noir.

Analyse des flèches

Comme nous l'indiquons dans le Tableau 7, 182 des 204 élèves dont les réponses sont accompagnées de flèches, expliquent la vision par un mouvement allant de l'œil vers l'objet (flèche Œil→Objet). On peut se reporter également à la Figure 21.

1 seule flèche	Œil→Objet	144	63%
	Objet→Œil	15	7%
2 flèches	Source ajoutée→Objet / Objet→Œil	7	3%
	Source ajoutée→Objet / Œil→Objet	31	14%
	Source ajoutée→Œil / Œil→Objet	3	1%
	Objet→Œil / Œil→Objet	4	2%
Total		N=204	90%

Tableau 7 : Répartition des flèches selon leur sens dans les réponses à la question n°2

Figure 21 ci-dessous rend compte des images pour lesquelles des flèches sont ajoutées.

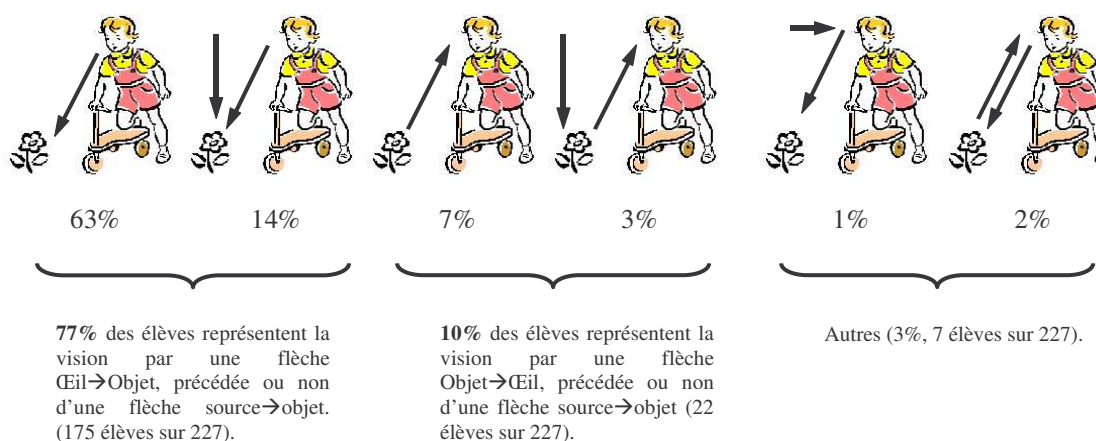


Figure 21 : Synthèse des résultats obtenus à la question n°2. Ces résultats concernent uniquement les réponses des élèves ayant représenté des flèches sur le dessin, soient 204 élèves sur les 227 interrogés (90% du total).

Si l'on tient compte des 14 élèves qui expliquent la vision par l'envoi de quelque chose depuis l'œil, sans l'aide du dessin, on constate alors que 196 élèves sur 227 (86% des élèves interrogés) expliquent la vision à l'aide de la composante Œil→Objet (à l'exclusion ou non de tout autre) et que 31 élèves sur 227 (14% des élèves interrogés) privilégient un sens

Objet→Œil (voir Tableau 8). Cela ne signifie pas pour autant que ces 31 élèves donnent une réponse conforme à celle du physicien¹⁰³.

Œil→Objet	196	86%
Objet→Œil	31	14%
Oeil→Objet + Objet→Œil	-4	-2%
Non-réponse	4	2%
Total	N=227	100%

Tableau 8 : Le « sens » de la vue. Répartition des réponses obtenues à la question n°2.

Quatre élèves expliquent la vision par deux flèches entrant et sortant de l'œil (nous avons donc comptabilisé ces réponses à la fois dans le sens œil→objet et dans le sens objet→œil). Nous pensons que ces élèves considèrent la vision à la fois pour sa dimension psychique et physique : la flèche Œil→Objet renvoie au « regard », à la « vision », ou simplement au fait de « voir » ou de « regarder ». La flèche Objet→Œil ne désigne pas la lumière mais « l'image » ou « l'objet »¹⁰⁴. Ainsi pour Vong, « la petite fille regarde la fleur, et la fleur envoie son image vers la petite fille, grâce à la lumière ». Pour Alexis, dont la réponse est très proche de l'explication optique « la fleur envoie un signal à la petite fille qui peut tourner la tête et envoyer une vision ».

Analyse du « sens » de la vue Œil→Objet.

Nous allons nous intéresser tout d'abord au sens Œil→Objet sans prendre en compte les autres composantes évoquées par les élèves (présence de lumière « sur » l'objet, entrée de lumière dans l'œil depuis la source), puisque notre préoccupation essentielle demeure la caractérisation du « sens » de la vue dans les raisonnements des élèves à propos de la vision.

Globalement, nous constatons que plus de 80% des élèves interrogés disent que la vision s'explique par un mouvement allant des yeux vers l'objet. Les flèches issues de l'œil désignent la plupart du temps « la vue », et quelque fois « les yeux, le regard ou la vision » ou simplement « quelque chose » (voir Tableau 9). Nous ferons ici une remarque identique à

¹⁰³ Le différentiel de 4 correspond au nombre d'élèves ayant répondu à la fois depuis et vers l'œil.

¹⁰⁴ Les réponses de ces quatre élèves sont comptabilisées à la fois dans le nombre des flèches Œil→Objet et dans celui des flèches Objet→Œil.

celle que nous faisons à propos des représentations des plus petits : lorsque les élèves de 4^e expliquent la vision, ils inscrivent leur propos dans un espace plus psychique que physique, ce qui, encore une fois, semble légitime et scientifiquement justifié. Toutefois, ce type de raisonnement à dominante psychique existe à l'exclusion de tout autre, c'est-à-dire qu'il ne coexiste pas avec un raisonnement physique dans lequel la lumière est le *stimulus* de la vue. Analysons maintenant le vocabulaire utilisé par les élèves pour expliquer la vision :

Vue	113	50%
Regard	25	11%
Vision	22	10%
Œil ou les Yeux	17	7%
Rayon	4	2%
Quelque chose	5	2%
Autres	10	4%
Total	N=196	86%

Tableau 9 : Vocabulaire utilisé par les élèves en réponse à la question n°2 pour expliquer la vision dans le sens Œil→Objet.

La lecture du Tableau 9 nous permet de remarquer que, d'une part, aucune de ces flèches n'est appelée « lumière », et que d'autre part, aucun élève n'explique la vision par l'envoi de lumière depuis l'œil. Ceci contredit l'affirmation des programmes de 4^e que nous rappelions plus haut¹⁰⁵ : le mot « lumière » n'est jamais utilisé pour désigner ce qui sort de l'œil (même dans le cas d'une réponse illustrée par les deux flèches Source→Œil/Œil→Objet, comme cela pouvait être le cas dans certaines réponses des plus petits).

Ensuite, la plupart des élèves qui expliquent le mécanisme de la vision dans un sens Œil→Objet utilisent l'expression : « l'œil envoie ». Par exemple, pour Anzanty, « quand on regarde, **c'est l'œil qui envoie** une vision », pour Michel, « **l'œil doit envoyer** un regard sur l'objet, car l'objet lui ne peut pas » et pour Sébastien, « si l'œil n'envoie rien, on ne peut pas voir, **il envoie** un rayon ». La vision est considérée par ces élèves essentiellement comme une activité de l'œil, caractérisée par l'utilisation d'un verbe d'action « envoyer » conjugué à la voix active. Et nous pensons que l'œil est également actif dans les réponses où les expressions

¹⁰⁵ « En ce qui concerne les sources de lumière, l'idée essentielle est de distinguer les sources primaires et secondaires, et d'identifier dans diverses situations le sens de propagation de la lumière. **Il convient dès le début de corriger la représentation selon laquelle l'œil émet de la lumière** ». C'est nous qui soulignons.

« aller vers l'objet » ou « sortir de l'œil » sont utilisées, comme c'est le cas dans la réponse de Aïcha : « La petite fille voit la fleur parce que **quelque chose sort** de ses yeux. Je sais pas trop quoi, mais quelque chose ». Ainsi, 187 élèves sur 196 (82% de l'ensemble des élèves interrogés) considèrent que l'œil est actif dans le processus de la vision. Ces élèves utilisent les expressions « envoyer vers, sortir de l'œil, aller vers l'objet ». Nous qualifierons ces 187 élèves d'extramissionnistes (EE), en référence au courant historique grec de l'extramission¹⁰⁶.

Quant aux 9 autres élèves (sur les 196 précédents), leurs réponses ne nous permettent pas de savoir si un mouvement depuis l'œil vers l'objet est envisagé, même dans le cas où l'élève a dessiné une flèche Œil→Objet. Ces réponses, où seule la présence des yeux est évoquée, sont proches de celles de Zora : « Si la petite fille voit la fleur, c'est grâce à ses yeux ».

On remarque là une différence avec les explications proposées par les plus petits : si la plupart des enfants de maternelle que nous avons interrogés représentent la vision par une flèche Œil→Objet, très peu d'entre eux disent que l'œil envoie quelque chose vers l'objet. Or, nous avons remarqué que dans ce cas, le « quelque chose » émis par l'œil semblait posséder des propriétés tactiles. L'analyse des réponses des élèves de 4^e à cette deuxième question laisse apparaître une tendance de raisonnement qui se rapproche de celle des plus petits sans pourtant pouvoir lui être assimilée.

Le « quelque chose » qui sort de l'œil, une entité quasi matérielle ?

La très grande majorité des élèves extramissionnistes (164 sur 187 EE au total) ne dit rien quant à l'action du « quelque chose » émis par l'œil. On sait simplement que « le regard, la vue ou la vision » sort de l'œil et se dirige vers l'objet. Parfois le regard se pose sur l'objet. Ainsi, pour Jacques, « la vue ça marche quand le regard sort de l'œil et se pose sur l'objet ». Mais il nous semblerait abusif de considérer ce « regard qui se pose » comme une entité quasi matérielle¹⁰⁷.

¹⁰⁶ Voir deuxième partie. Si l'on s'en tient uniquement à la caractérisation du « sens » de la vue, il nous semble justifié d'assimiler les élèves de 4^e qui expliquent la vision par l'émission de « quelque chose » depuis l'œil, et les tenants du courant extramissionniste (Platon, Euclide, Ptolémée etc.). C'est d'ailleurs selon ce même critère que nous avons qualifié la réponse de Thibaud d'intromissionisme naïf.

¹⁰⁷ Ce type de réponses peut être influencé par des expressions telles que « poser un regard, poser les yeux... »

En revanche, 23 élèves (sur les 187 EE) confèrent à l'entité qui sort des yeux certaines propriétés tactiles. La fleur est identifiée sous l'action d'un regard ou d'un rayon, qui sortant de l'œil, touche l'objet, l'entoure même et en reconnaît la forme et la couleur. Par exemple, Anthony propose l'explication suivante :

Pour que la petite fille voie la fleur, sa vision sort de son œil, elle va sur l'objet, c'est comme un radar. Quand elle est sur la fleur elle reconnaît sa forme, sa couleur, tout ce qui permet de reconnaître la fleur.

En outre, 11 d'entre eux vont jusqu'à comparer cette entité à une main. Ainsi, Julie décrit le mécanisme suivant :

Quand la petite fille voit la fleur, il y a un regard qui sort de l'œil, qui va vers l'objet et qui le touche. C'est un peu comme une main. C'est comme dans l'expression 'touche avec les yeux'.

Nous avons regroupé toutes les réponses dans lesquelles l'action de l'entité émise était explicitement assimilée à celle d'une main, ainsi que toutes celles dont le vocabulaire indiquait l'idée d'un contact entre l'entité et l'objet, à condition que ce contact permette l'identification de la forme ou/et de la couleur de l'objet. Selon ces critères, 10% de l'ensemble des élèves interrogés (23 sur 227) confèrent à l'entité qui sort des yeux des propriétés tactiles (reconnaissance de l'objet par contact). Nous considérons donc qu'il existe une tendance de raisonnement, certes minoritaire mais néanmoins présente chez les élèves de 4^e à considérer le mécanisme de la vision comme l'émission par l'œil d'une entité comparable à un pseudopode sensitif.

Analyse du « sens » de la vue Objet→Œil

Nous allons maintenant nous intéresser aux élèves qui expliquent la vision par une émission depuis l'objet. Nous cherchons à savoir si l'entité qui part de l'objet est, ou non, de la lumière, et si cette entité pénètre dans l'œil de la petite fille. Pour des raisons identiques à celles évoquées précédemment, nous nommerons les élèves qui expliquent la vision par quelque chose qui entre dans l'œil, élèves intromissionnistes (EI) en référence au courant grec de l'intromission¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Là encore, il s'agit d'un rapprochement lié au « sens » de la vue Objet→Œil. Les épicuriens notamment expliquent la vision comme la réception dans l'œil d'une entité issue de l'objet. Voir deuxième partie.

Ainsi que nous l'avons évoqué au début de cette analyse, un seul élève explique la vision de façon conforme à l'explication optique, c'est-à-dire en indiquant d'une part que l'œil reçoit de la lumière depuis la fleur, et d'autre part en faisant référence au phénomène de la diffusion, à savoir au fait que la fleur renvoie la lumière qu'elle reçoit. Deux autres élèves disent que l'œil reçoit de la lumière. Mais l'idée de chaîne *Source* → *Objet* → *Œil* (où la flèche indique le sens de propagation de la lumière depuis la source) n'est présente dans aucune de ces deux réponses. Ainsi, pour Cheick : « la fleur doit envoyer quelque chose dans l'œil de la petite fille, une lumière par exemple », et pour Anthony, « la petite fille voit la fleur parce que la fleur envoie de la lumière ». Par ailleurs, deux élèves proposent une explication que l'on peut considérer comme proche de celle que nous attendions. Certes la lumière n'est pas explicitement nommée, mais la vision est expliquée comme une réponse de l'œil à un signal provenant de l'objet :

La fille voit la fleur parce que la fleur envoie un signal, un truc invisible vers l'œil, qui fait qu'on va ouvrir l'œil et regarder la fleur. (Sonia)

Or, cette explication ne nous paraît pas incompatible avec le mécanisme de la vision tel que nous avons présenté en introduction. Par conséquent, il ne semble pas déraisonnable de considérer la lumière comme un signal émis par un objet, et la vue comme une réponse à ce signal.

Hormis ces cinq élèves pour lesquels la lumière (ou un signal) est envoyée par la fleur (environ 2% de l'ensemble des élèves interrogés), tous les élèves intromissionnistes (il s'agit des élèves qui évoquent un sens objet → œil) expliquent que la petite fille voit la fleur car celle-ci lui envoie son image, son apparence, sa forme, sa couleur etc., selon la répartition proposée dans le Tableau 10.

Image, reflet	15	7%
Fleur (ou objet)	3	1%
Forme, apparence, quelque chose	4	2%
Couleur	4	2%
Lumière, signe, signal	5	2%
<hr/>		
Total	N=31	14%

Tableau 10 : Vocabulaire utilisé par les élèves en réponse à la question n°2 pour expliquer la vision dans le sens Objet → Œil.

Ainsi pour Asma : « il faut que la fleur envoie son image, sinon la fille ne peut pas voir ». Et pour Benjamin : « la fleur envoie sa couleur et son apparence dans les yeux de la petite fille ». Précisons dès à présent que les yeux ne sont pas toujours explicitement évoqués, et la direction des flèches ne permet pas de savoir si elles indiquent réellement une entrée dans l'œil. Ainsi, seuls 11 élèves (sur les 31 élèves EI¹⁰⁹) parlent d'une réception dans l'œil de quelque chose venant de l'objet : « La petite fille voit la fleur quand le reflet de la fleur arrive dans son œil » (Ali). Les autres se contentent de dire que la fleur envoie quelque chose sans en préciser la destination finale. Quoiqu'il en soit, lorsque le vocabulaire utilisé par les élèves pour désigner le « quelque chose » envoyé par l'objet est du type « image », « reflet », « forme » et « fleur », on peut penser que le « quelque chose » est considéré comme une entité globale, formée à partir de l'objet. Ce type de raisonnement (21 sur 31 EI) rappelle les raisonnements en « image voyageuse » où « une image, formée dès le départ se promène d'un bloc. »¹¹⁰. Ils sont à distinguer des raisonnements dans lesquels l'entité émise par l'objet est la couleur. Ainsi, pour 4 des 31 EI, la fleur envoie sa couleur. Par exemple, pour Hassan : « La petite fille voit la fleur parce que la fleur lui envoie ses couleurs ». De telles réponses ne permettent pas de savoir si les élèves parlent de la « couleur-matière », ou de la « couleur-lumière »¹¹¹.

Ajoutons pour terminer que certains élèves donnent quelques précisions quant au rôle de la lumière. 13 élèves (sur les 31 EI) précisent que la fleur émet quelque chose lorsqu'elle est éclairée. Et pour 6 des 31 EI, la lumière sert à « renvoyer » ou à « réfléchir » l'objet. Parmi ces 6 élèves, nous retrouvons ceux qui, à la question n°1, avaient expliqué qu'on ne pouvait pas voir dans le noir parce qu'il n'y avait « pas de lumière pour diffuser l'image ». Nous avons également obtenu une réponse dans laquelle la lumière accompagne l'image depuis l'objet. Dans ce cas, l'entrée de lumière dans l'œil est bien évoquée. On peut pourtant supposer que c'est bien l'arrivée d'une image dans l'œil qui est responsable de la vue, et non celle de la lumière.

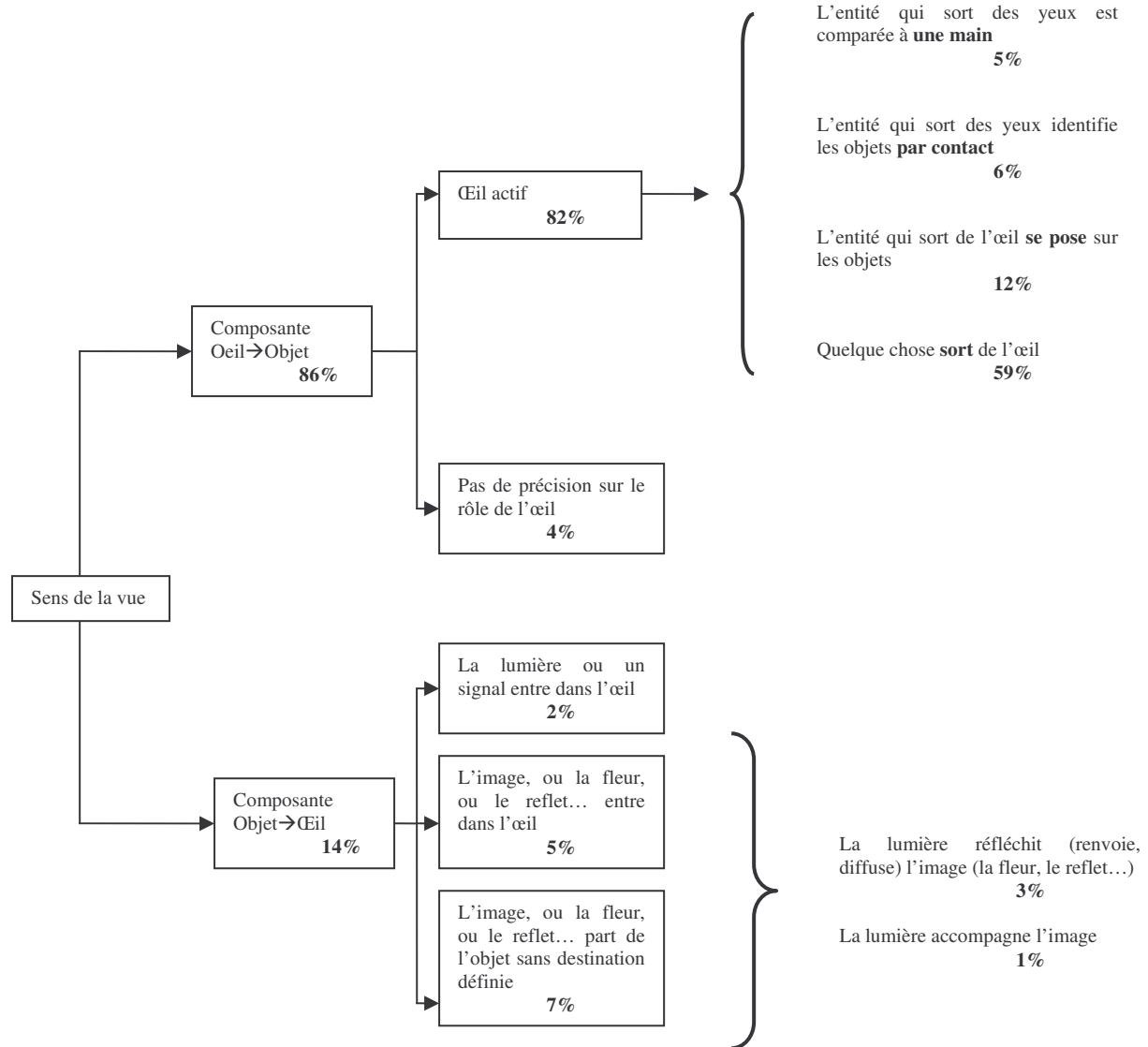
¹⁰⁹ Comme pour les petits, l'appellation EI désignent les élèves intromissionnistes qui expliquent la vue dans un sens objet → œil.

¹¹⁰ Pour une synthèse sur l'image voyageuse voir Viennot L. *Raisonnement en physique, la part du sens commun*, op. cit. p. 39.

¹¹¹ Voir Chauvet F. *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*, thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1994.

Quand la petite fille voit la fleur, la lumière vient sur la fleur, et elle prend l'image de la fleur. L'image arrive dans l'œil de la fille avec la lumière, et elle voit. (Pierre)

La Figure 22 propose une synthèse des réponses obtenues à la question n°2.



En conclusion, si nous considérons les réponses des élèves interrogés du strict point de vue du « sens » dans lequel ils envisagent la vision, nous constatons deux tendances antagonistes de raisonnements : le sens Œil→Objet et le sens Objet→Œil. Globalement, très peu d'élèves expliquent la vision par la réception dans l'œil de quelque chose issu de l'objet. Et lorsque c'est le cas, leurs raisonnements semblent obéir à des principes proches du raisonnement en

« image voyageuse ». En fait, pour la plupart des élèves interrogés, l'œil est actif, et la vision résulte de l'envoi par l'œil de quelque chose vers l'objet à regarder. Ce type de raisonnement s'inscrit dans un espace essentiellement psychique, et sa prégnance s'explique sans doute par le fait que pour voir un objet il est nécessaire de diriger son regard vers l'objet. Par conséquent, la cause de la vue est limitée à l'action du regard, et il est compréhensible, dans ce contexte, que les élèves expliquent la vision par l'émission de quelque chose depuis l'œil. Contrairement à ce que disent la majorité des plus petits, les élèves de 4^e parlent de la vue comme le résultat d'une émission à partir de l'œil, et pas simplement d'une action à distance orientée, comme cela semblait être le cas pour les enfants de maternelle que nous avons interviewés. Précisons, en outre, que le quelque chose qui sort de l'œil semble posséder parfois des propriétés tactiles ; il est même, dans certains cas, comparé à une main. Ajoutons enfin que **ce qui est émis par l'œil n'est jamais de la lumière**. Ce résultat contrarie l'affirmation des programmes selon laquelle les élèves expliqueraient la vision par l'envoi de lumière depuis l'œil.

5. Les raisonnements des enfants et des élèves à propos de la vision : bilan

Comme nous l'avons dit en introduction, il semble difficile d'imaginer qu'un enfant puisse bâtir un raisonnement selon lequel la lumière « sort » de ses yeux et que c'est grâce à cela qu'il voit. Il construit donc un système d'explications, incommensurable avec le modèle théorique, dans lequel la lumière est certes présente (puisqu'on ne voit pas dans le noir) mais n'est pas caractérisée comme véhiculant l'information visuelle jusqu'à l'œil, pas plus qu'elle n'agit depuis l'œil. Le concept physique actuel de lumière demande un degré d'abstraction tel qu'il échappe aux mécanismes d'élaboration guidés par la pensée naturelle. Et puisque pour voir (en vision directe) il est nécessaire que l'objet et l'œil soient « face à face », il n'est guère surprenant que la vision soit expliquée dans certains cas comme le résultat d'une activité de l'œil, activité dont l'agent (le regard, la vue) est rendu opérationnel parfois par la présence de la lumière, mais n'est pas la lumière elle-même. Ce que cet élève de 4^e résumait parfaitement en disant : « La lumière attire le regard ». Cette dimension physio-psychique du mécanisme de la vision qui prend en compte le rôle de l'observateur n'est pas à négliger, et devra sans doute être prise en compte dans l'enseignement.

Dans un souci de synthèse et/ou de simplification, les concepteurs des programmes interprètent ces explications d'élèves en effectuant un glissement subreptice du raisonnement « œil comme agent actif », vers l'interprétation « œil comme émetteur de lumière »¹¹². Pourtant, si une fois encore nous prenons le concept de lumière au sens de la physique (et même dans le sens restrictif de ce qui est émis par les sources primaires), rien ne nous permet d'affirmer que les enfants et les élèves que nous avons interrogés expliquent la vision en inversant le sens de propagation de la lumière. Une telle interprétation nous paraît abusive, elle ne reflète guère les idées exprimées par ces élèves, et néglige, de fait, tout un ensemble de processus de raisonnements sous-jacent.

¹¹² Sur ce point, les programmes de l'école élémentaire reflètent davantage les raisonnements des enfants à propos de la vision. En effet, dans un paragraphe consacré aux « difficultés provenant des idées préalables des élèves » de la Fiche Connaissance n°17 intitulée « Lumière et Ombre » on peut lire « Le mécanisme de la vision des objets est souvent conçu suivant le modèle erroné du 'rayon visuel' partant de l'œil pour aller capter l'image de l'objet. Ce modèle est conforté par les expressions 'jeter un œil', 'balayer du regard' etc. ». Voir Fiches Connaissances, *Documents d'accompagnement des programmes des cycle 2 et 3 de l'école élémentaire*, Ministère de l'Education Nationale, Scérén, CNDP, 2002.

DEUXIEME PARTIE : Une histoire des théories de la vision

Ainsi, vous entendrez que cette façon de parler, le feu est chaud, la perdrix est savoureuse, le musc est odorant, et le tambour est sonoreux, ne veulent dire autre, sinon que le feu peut exciter en nous cette sensation de chaleur, la perdrix, celle de la saveur, le musc de l'odeur, et le tambour du son. Tout cela se conçoit assez facilement ; mais il n'en est pas de même de l'impression des objets sur l'œil, et du sentiment qui en résulte, lequel est ce qu'on nomme lumière ou couleur, parce que nous les rapportons au dehors et loin de nous, et cependant la faute vient de ce que nous ne reconnaissons aucune application des objets à l'œil, comme on sait que le feu s'applique à la main, la viande à la langue, les parfums au nez, et peut être l'air mu à l'oreille.

Cyrano de Bergerac, 1662.

Depuis le début des années 1920, l'histoire des sciences se pratique selon deux orientations distinctes : L'une, dite internaliste, se veut une reconstruction rationnelle du développement de la connaissance. Dans cette perspective, la science progresse grâce à un moteur et une nécessité internes. L'historien des sciences Georges Canguilhem la définit ainsi :

L'internalisme consiste à penser qu'il n'y a pas d'histoire des sciences, si l'on ne se place pas à l'intérieur même de l'œuvre scientifique pour en analyser les démarches par lesquelles elle cherche à satisfaire aux normes scientifiques qui permettent de la définir comme science et non comme technique ou idéologie. (...) Ici par conséquent, le fait d'histoire des sciences est traité comme un fait de science, selon une position épistémologique qui consiste à privilégier la théorie relativement au donné empirique¹¹³.

L'autre, dite externaliste, est une histoire contextualisée qui rend l'étude des théories scientifique indissociable de leur environnement économique, social et culturel :

La science est ainsi traitée comme une institution sociale et plus comme un savoir, et la question de ses liens à l'histoire générale des sociétés est profondément repensée¹¹⁴.

¹¹³ Canguilhem G. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Vrin, 1968, p. 15. Pour une approche semblable, voir également Bachelard G. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, Paris 1951, Koyre A. *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, PUF, Paris, 1966, Lakatos I. *Histoire et méthodologie des sciences*, Bibliothèque d'histoire des sciences PUF, Paris 1994.

¹¹⁴ Pestre D. Les science et l'histoire aujourd'hui, in *Le Débat*, vol. 102, 1998, p. 53. Pour une approche similaire, voir également Shapin S. History of science and its social reconstructions in *History of science*, n° 20, 1982, pp. 157-211, Bloor D. *Sociologie de la logique ou les limites de l'épistémologie* (1976), Pandore, 1982.

Selon cette position les résultats de l'activité scientifique peuvent être dans une large mesure expliqués par l'étude psychologique et sociologique de ces acteurs. A titre d'exemple, Steven Shapin s'intéresse aux pratiques humaines concrètes au travers desquelles se forment les idées et les concepts scientifiques. Shapin inclut dans son propos une réflexion sur les connaissances scientifiques comme partie intégrante d'un tout social :

S'il faut comprendre la science comme une pratique historiquement située à partir des traits collectifs (c'est-à-dire sociologiques), il convient alors de ne négliger aucun de ses aspects et de n'oublier ni les notions et les pratiques en jeu, ni les formes institutionnelles de la science, ni les usages sociaux qui en sont faits. Celui qui voudrait représenter la signification sociologique de la science ne peut tout simplement pas ignorer l'ensemble des connaissances des hommes de science dont il est question, ni la manière dont ils obtenaient ces connaissances¹¹⁵.

L'objet du présent chapitre est de proposer une histoire des théories de la vision qui puisse servir l'élaboration d'une séquence d'enseignement d'optique. Pour cela, nous ferons le choix d'une reconstruction rationnelle dans une perspective internaliste. En particulier, nous entendons mettre en évidence les idées-clés ayant permis l'élaboration rationnelle des théories de la vision. Certains historiens s'élèvent aujourd'hui contre l'opposition entre internalisme et externalisme. Ils considèrent en effet que la séparation entre histoire internaliste et histoire externaliste ne paraît plus guère justifiée que par l'héritage d'une querelle d'écoles. Notre choix contrarie donc l'approche syncrétique revendiquée par l'historien Jean Rosmorduc :

La réalité historique n'est donc bien retranscrite, ni par l'internalisme, ni par l'externalisme. Les deux visions sont complémentaires et leur opposition, à l'heure de l'interdisciplinarité, paraît bien désuète¹¹⁶.

Sans parler d'opposition, nous pensons pour notre part qu'une distinction demeure justifiée en particulier dans le domaine de l'enseignement scientifique. En effet, les deux histoires offrent, selon nous, des opportunités pédagogiques et didactiques bien distinctes.

1. L'histoire des théories de la vision : le choix d'une reconstruction rationnelle

Proposer une l'histoire des théories de la vision nécessite que l'on adopte une position particulière selon que l'on souhaite intégrer à cette histoire une dimension sociale ou non. Une

¹¹⁵ Shapin S. *La Révolution Scientifique*, trad. C. Larssonneur, Flammarion, Paris, 1998, p. 21.

¹¹⁶ Rosmorduc J. *L'histoire des sciences*, Hachette Education, Paris, 1996, p.61.

pratique sociale des sciences nous semble mieux convenir à une approche transversale de l'enseignement, celle de l'interdisciplinarité, et qu'une histoire internaliste est la seule qui permette de réfléchir aux enjeux cognitifs d'un enseignement disciplinaire scientifique.

1.1. L'histoire sociale des sciences : un outil pour l'interdisciplinarité

Le système éducatif français semble favoriser de plus en plus la mise en place d'espaces de travail interdisciplinaires. Au primaire, les enseignants adoptent le plus souvent une pédagogie dite « de projet » dans laquelle les différentes disciplines de l'école se retrouvent autour d'un thème commun. Sur un principe identique, les Itinéraires de Découverte (IDD) invitent les enseignants du collège de disciplines différentes à collaborer¹¹⁷. Enfin, dans le cadre des Travaux Personnels Encadrés (TPE) les élèves de première et de terminale doivent élaborer un projet de recherche interdisciplinaire supervisé par des enseignants de matières différentes¹¹⁸. Dans un tel contexte, une histoire des sciences externaliste paraît trouver naturellement sa place. Elle est un carrefour où se rencontrent différents points de vue (historiques, scientifiques, sociaux...) et revendique, de fait, une interdisciplinarité qui ouvre la voie à plusieurs entrées possibles : en histoire, il devient envisageable d'étudier l'environnement social des savoirs scientifiques d'une époque donnée, savoirs qui sont abordés parallèlement en sciences physiques. Par cette approche interdisciplinaire, l'élève est censé trouver une complémentarité, une cohérence entre des matières qu'il a trop souvent tendance à dissocier les unes des autres. François Audigier et Pierre Fillon vont même plus loin et soutiennent qu'en inscrivant les savoirs scientifiques dans leur contexte social, l'élève a davantage de chances de les comprendre :

La démarche historique permet de rendre plus intelligibles les savoirs scientifiques, de montrer les relations complexes entre les sciences, les techniques, les sociétés et de participer ainsi à la formation civique¹¹⁹.

¹¹⁷ Pour plus de détails sur les IDD on pourra se référer au *Bulletin Officiel de l'Education Nationale*, n°31 du 29 août 2002.

¹¹⁸ Pour plus de détails sur les TPE on pourra se référer au *Bulletin Officiel de l'Education Nationale*, n°39 du 24 octobre 2002.

¹¹⁹ Audigier F., Fillon P. *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques, une approche pluridisciplinaire*, INRP, Paris, 1991.

Parler des sciences et du réseau qu'elles entretiennent avec des champs disciplinaires qui leur sont extérieurs permet effectivement aux élèves d'envisager des liens entre des disciplines le plus souvent cloisonnées. Toutefois, nous pensons que l'intelligibilité d'un savoir scientifique ne passe pas nécessairement par l'exposition d'une histoire sociale de la science.

1.2. L'histoire rationnelle : un appui pour l'élaboration d'une séquence d'enseignement à composante historique

Nous cherchons à construire une séquence d'enseignement à partir de l'histoire des théories de la vision. L'objectif cognitif de cette séquence est que les élèves acceptent l'idée que pour voir un objet il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil. Cet objectif de connaissance est une transposition de l'explication proposée par Alhazen au 11^e siècle. Ce que nous souhaitons, c'est présenter aux élèves les éléments ayant permis l'émergence de cette explication en espérant leur faire suivre un cheminement de pensée rationnel proche de celui d'Alhazen. Cette démarche constitue d'ailleurs pour Bachelard une « nécessité éducative » :

On voit alors la nécessité éducative de formuler une histoire récurrente, une histoire qu'on éclaire par la finalité du présent, une histoire qui part des certitudes du présent et découvre, dans le passé, les formations progressives de la vérité. Ainsi, la pensée scientifique s'assure dans le récit de ses progrès¹²⁰.

C'est bien ainsi que nous entendons procéder par la suite. A savoir, partir du présent afin de découvrir, dans le passé, les éléments ayant permis l'émergence de la physique actuelle. La séquence que nous proposerons aux élèves sera un suivi rationnel des idées historiques, une histoire du « progrès » de la pensée scientifique. Pour cela, il nous paraît nécessaire de mettre en évidence les idées-clés qui constituent les fondements d'une élaboration rationnelle des théories de la vision sans tenir compte du contexte social dans lequel évoluent ces théories.

Dans le cas qui nous occupe, il nous semble difficile de ne pas évoquer la querelle intellectuelle autour du « sens » de la vue qui vit s'opposer les savants depuis l'Antiquité jusqu'au 13^e siècle. D'abord parce que la reconstruction historique que nous proposons

¹²⁰ Bachelard G. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, op. cit. p. 26.

permettra de comprendre comment la querelle a pris fin, et ensuite parce que la transposition de cette querelle à une situation de classe constitue la clé de voûte de la stratégie pédagogique que nous souhaitons adopter. Et cette transposition n'est possible que si l'on retrouve dans la classe une querelle proche de celle de l'histoire. Cependant, évoquer le contexte social de la controverse du « sens » de la vue ne nous paraît guère judicieux si l'on souhaite justement s'appuyer sur une possible identification des élèves aux savants. En d'autres termes, transposer une controverse historique à une controverse de classe nous paraît envisageable uniquement si l'on considère les savoirs pour eux-mêmes, puisque les contingences sociales des populations concernées sont différentes et de fait, intransposables.

Dans une étude sur les controverses scientifiques, le sociologue Dominique Raynaud plaide également en faveur d'une histoire internaliste des théories de la vision. Il montre en effet que l'explication proposée par Alhazen en règlement de la controverse du « sens » de la vue est validée, non pas parce qu'elle répond à une commande sociale particulière, mais bien que parce qu'elle est rationnellement plus acceptable que les autres :

A l'inverse de ce que prédit une reconstruction sociologique inspirée par les principes du relativisme, les positions intronissionistes ont été acquises par un examen rationnel du problème contre l'influence de facteurs extrascientifiques (...). Les controverses dans lesquelles il y a détermination sociale des contenus scientifiques sont loin d'être une généralité. La controverse sur le sens des rayons visuels obéit à un enchaînement manifestement différent. Car l'optique médiévale présente cette particularité d'être à la fois un lieu de controverse où les connaissances auraient dû être socialement déterminées par des facteurs théologiques, mais qui ne l'ont pas été¹²¹.

Proposer la revue historique d'une théorie physique, c'est nécessairement prendre le parti d'une reconstruction particulière. Or, si nous faisons appel à l'histoire des théories de la vision, c'est avant tout dans le but d'éclairer l'élaboration d'une séquence d'enseignement comme un ensemble cohérent et rationnel d'éléments permettant une compréhension optimale du modèle reconnu par la physique actuelle. Par conséquent, l'histoire que nous allons maintenant présenter est le résultat d'une reconstruction rationnelle des théories de la vision selon une approche internaliste.

¹²¹ Raynaud D. *Sociologie des controverses scientifiques*, PUF, 2003, p. 133.

1.3. Cadre méthodologique

Notre histoire des théories de la vision sera sans doute différente de celles que l'on peut trouver dans la littérature dans la mesure où notre objectif est qu'elle profite à une séquence d'enseignement. Toutefois, nous nous référerons aux ouvrages de Ernst Mach, de David Lindberg, ainsi qu'à ceux de Vasco Ronchi et de Gérard Simon¹²².

Nous faisons le choix de conduire notre recherche historique dans une perspective didactique. On pourrait nous objecter qu'une telle posture risque d'induire une lecture historique subjective et superficielle. Pourtant, il n'est pas question de travestir la genèse historique pour mieux l'adapter à un cadre extérieur particulier (en l'occurrence, celui de l'enseignement des sciences). Disons plutôt que nos préoccupations didactiques nous permettront d'envisager une exégèse transposable à une séquence d'enseignement en évitant l'accumulation de faits historiques qui ne nous seraient d'aucune utilité. Du point de vue méthodologique, la reconstruction historique que nous proposons s'appuie davantage sur une lecture attentive des textes originaux que sur les historiographies disponibles dont nous nous démarquerons parfois. Nous rechercherons dans ces textes les éléments nécessaires et suffisants qui, regroupés de façon rationnelle, devraient nous permettre de faire comprendre aux élèves comment la lumière est devenue le *stimulus* de la vue, tout en respectant le niveau d'exigence conceptuel imposé par le cadrage institutionnel¹²³. Et même si ce cadrage exclut l'étude physio-psychologique du système visuel, ainsi que son interaction avec la lumière, nous l'intégrerons à notre histoire, par souci de cohérence et par respect des interdépendances disciplinaires en jeu dans l'explication du mécanisme de la vision.

Nous circonscrirons notre étude historique à la science occidentale et arabe sur une période allant du 5^e siècle avant J.C. au 18^e siècle après J.C. Dans un premier temps, nous proposerons une analyse des caractéristiques particulières de l'optique de l'Antiquité afin de comprendre

¹²² Mach E. *The principle of physical optics, an historical and philosophical treatment*, New York, 1953, Ronchi V. *Histoire de la lumière*, trad. J. Taton, Colin, Paris, 1956, Ronchi V. *L'optique, science de la vision*, Masson, Paris, 1966, Simon G. *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, Seuil, Paris 1988, Simon G. *Archéologie de la vision. L'optique, le corps et la peinture*, Seuil, 2003, Lindberg D.C., *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, The University of Chicago Press, Chicago-London, 1976.

¹²³ Nous parlons ici du cadrage imposé par les Programmes officiels de sciences physiques des classes de cycle III et de 4^e.

le cadre philosophique et métaphysique des théories de la vision qui s'y trouvent représentées. Nous verrons également comment ces théories influencent l'optique médiévale occidentale. Ensuite, nous analyserons la façon dont Alhazen parvient à rompre avec les théories grecques en posant la lumière comme agent médiateur de la vue. Enfin, nous étudierons la façon dont la science classique occidentale s'est appropriée la découverte d'Alhazen.

2. Une histoire des théories de la vision ou comment la lumière est devenue le *stimulus* de la vue

Lumière : Fluide très délié, qui en affectant notre oeil de cette impression vive que l'on nomme clarté, rend les objets visibles. Ce fluide réside, comme intermède, entre l'objet visible et l'organe qui en reçoit l'impression et il occupe, par lui-même et par son action l'intervalle qui les sépare. Ce qui rend la clarté, ce qui rend les objets visibles est donc une matière, dont l'action peut être plus ou moins forte suivant les circonstances¹²⁴.

Cette définition, adoptée en 1781 par l'Académie Royale des Sciences, intègre différents éléments conceptuels permettant d'envisager une explication de la vision rationnellement acceptable du point de vue du rôle de la lumière. Elle est l'aboutissement d'un cheminement rationnel de pensée qui passe par l'élaboration d'un certain nombre de principes, celui de la diffusion notamment, et par l'observation raisonnée de quelques phénomènes tels que l'éblouissement et la dilatation pupillaire de l'œil. C'est ce cheminement que nous souhaitons retracer ici.

2.1. La vision dans l'Antiquité

Une question très débattue, et qui eut une très grande importance dans la philosophie naturelle des anciens, des origines aux siècles ultérieurs, porte sur la confiance que l'on peut accorder aux sens. En d'autres termes, notre tentative d'édifier une représentation du monde est-elle

¹²⁴ *Dictionnaire raisonné de physique de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1781. Il est intéressant de remarquer que la « lumière » ainsi définie est considérée comme une entité statique puisqu'elle « réside » entre l'objet et l'œil, et qu'elle « occupe » l'espace qui les sépare. Examinée sous l'angle de la propagation la définition de 1781 ne correspond pas au concept actuel de *lumière*.

fondée sur les seules perceptions sensorielles ? Les réponses philosophiques de l'époque ne s'accordent pas et nous n'entendons guère prendre part, ici, au débat. Nous souhaitons toutefois indiquer que la naissance de l'optique est liée à ce débat. Elle va s'attacher à comprendre le « comment » de la vue dans une liberté de pensée expurgée de toute contrainte disciplinaire, comme nous le verrons plus avant. Ainsi, la préoccupation unique de l'optique de l'Antiquité est-elle la compréhension du phénomène de la vision, dans une étude plus large des sensations et de la connaissance. Elle n'est pas une science de la lumière, pas plus qu'elle ne représente une catégorie particulière d'une physique encore mal définie. Elle intègre des dimensions variées (biologiques, physiologiques, géométriques etc.).

2.1.1. L'optique de l'Antiquité, une science de la vision

Il est communément admis que les savants de l'Antiquité posèrent les bases fondamentales de l'optique en proposant la notion de rayon comme modèle géométrique de la lumière. Cette idée est plus un raccourci qu'une réalité historique, car si une géométrisation existe bien, elle concerne davantage le regard que la lumière. Dans les historiographies contemporaines, le terme « lumière » est généralement utilisé en traduction du *phaos* grec. Or, celui-ci n'a pas le sens que nous lui reconnaissons aujourd'hui. Le terme *phaos* est polysémique, et il ne désigne pas nécessairement la lumière au sens de ce qui est émis par les sources lumineuses, pas plus que les *phosphora* dont la signification est plus proche du « regard » ou de la « vision » que de la « lumière » telle que nous la définissons aujourd'hui.

Il existe dans la littérature, même la plus avertie, certaines confusions entre lumière et vision. A ce propos, Gérard Simon n'hésite pas à dénoncer les extrapolations abusives réalisées par certains auteurs qui assimilent trop fréquemment le rayon visuel au rayon lumineux, voire à la lumière au sens de ce qui éclaire, comme l'illustre ce passage de David Lindberg :

La rectilinearité des rayons qu'Euclide se donne dans son premier postulat, permet de développer une théorie de la vision selon les lignes géométriques. Cette règle simple, gouvernant la propagation rectiligne de la lumière ayant été donnée, il est possible d'user des lignes droites d'un diagramme géométrique pour représenter les rayons visuels et transformer ainsi les problèmes optiques en problèmes géométriques¹²⁵.

¹²⁵ Lindberg D. cité par Simon G. *Le Regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, op. cit. p. 24.

Nous avons nous-même rencontré de telles confusions au fil de nos lectures. A titre d'exemple, et toujours à propos des travaux d'Euclide, Bernard Maitte nous propose la formule suivante : « Euclide vient de créer un concept nouveau, celui du rayon lumineux, filet élémentaire de lumière »¹²⁶. De même, lorsqu'il résume les théories grecques de la vision (qu'il nomme « théories grecques de la lumière »), Ahmed Djebbar écrit :

La troisième théorie est celle de l'émission par l'œil, selon un cône, de rayons lumineux qui en aboutissant à l'objet, déclenchent la sensation visuelle. On sait qu'elle a été mathématisée par Euclide et soumise à l'expérience par Ptolémée. Après cela il y eut la théorie de Platon, qui combinait la précédente avec un principe d'émanation de l'objet, à travers sa couleur¹²⁷.

Or, la géométrisation euclidienne ne concerne nullement la lumière, mais le regard. Rappelons les trois premiers postulats de l'*Optique* d'Euclide :

Posons que :

1. Les lignes droites issues de l'œil franchissent des distances d'une grande longueur ;
2. La figure circonscrite par les rayons visuels est un cône qui a son sommet dans l'œil et sa base aux limites de ce qui est vu ;
3. On voit ce sur quoi tombent les rayons visuels, on ne voit pas ce sur quoi ils ne tombent pas¹²⁸.

Les rayons visuels ($\alpha\chi\tau\iota\zeta$) euclidiens sont issus de l'œil, ils figurent le regard et non la lumière ($\phi\omega\sigma$). A ce sujet, et afin d'éviter toute confusion possible, Ronchi emploie le mot latin indéfini *quid*, qu'il n'associe pas à la lumière lorsqu'il évoque un mode de communication entre l'œil et l'objet vu :

On pouvait penser à une liaison à l'aide d'un *quid* qui, sortant de l'œil allait vers l'objet vu, ou d'un *quid*, qui, de la chose vue allait vers l'œil, ou enfin à une coexistence de ces deux *quid*, en sens inverse l'un de l'autre¹²⁹.

Par conséquent, il est tout à fait anachronique de considérer le rayon visuel comme un rayon lumineux, qui simplement sortirait de l'œil au lieu d'y entrer. La parenté du rayon visuel avec la lumière, souvent mentionnée dans les textes anciens, est à prendre comme l'expression de son appartenance en tant qu'espèce à un genre, le genre igné, de la même façon que tout corps à l'état liquide était tenu pour aqueux, et tout solide, pour terrestre.

¹²⁶ Maitte B. *La Lumière*, Seuil, Paris, 1981, p. 17.

¹²⁷ Djebbar A. *Une histoire de la science arabe*, Seuil, Paris, 2001, p. 266.

¹²⁸ Euclide, *L'optique et la catadioptrique*, trad. Ver Eecke P. Blanchard, Paris, 1959.

¹²⁹ Ronchi V. *Histoire de la lumière*, op. cit. p. 4.

L'optique de l'Antiquité n'a en effet aucune raison de se doter d'un outil tel que la lumière indépendante de tout référent sensoriel, puisque l'objet dont elle s'occupe est la vision que les *eidola* et les rayons visuels parviennent parfaitement à expliquer. Il n'y a nécessité d'aucun fluide ou mouvement se propageant des sources aux objets, et de ceux-ci aux yeux, et donc aucune raison de se demander en quoi consiste ce fluide. Seul Aristote y fait allusion, comme nous le verrons plus avant. En conclusion, rayon visuel ou pas, la lumière n'est le protagoniste d'aucune théorie antique de la vision. Elle est certes nécessaire à l'exercice de la vue, puisque celle-ci cesse dans l'obscurité totale de remplir son office, mais elle n'est nulle part l'entité physique spécifique à laquelle l'organe visuel est sensible.

Même lorsqu'elle traite des images optiques (par réflexion ou par réfraction), l'optique antique demeure la vision. Ainsi, la réfraction, largement étudiée par Ptolémée et dont Simon se fait l'analyste rigoureux, est-elle présentée comme la rupture du regard sur un objet qui conduit à voir cet objet où il n'est pas. La réfraction serait donc, dans le contexte de l'Antiquité, une véritable « pathologie du regard »¹³⁰. Les résultats numériques obtenus par Ptolémée sont donc une description quantifiée des règles auxquelles obéit le regard :

Rien dans la manière de décrire le phénomène ne recoupe notre notion d'image réfractée : l'objet est simplement vu en un autre lieu que le sien¹³¹.

L'optique antique fut en premier lieu une « analytique du regard », où la vision s'explique comme la transformation du visible en du vu. De plus, la lumière n'est définie que par sa fonction qui est de rendre opérant le regard, de rendre visible le visible. L'optique de l'Antiquité est la science de la vision guidée par un environnement philosophique particulier, et non une science de la lumière telle qu'elle l'est devenue par la suite. A ce propos, Vasco Ronchi nous propose l'analyse suivante :

A vrai dire, il ne semble pas que les philosophes grecs se soient posé nettement le problème de la lumière. Ils se préoccupaient avant tout de résoudre le problème de la vision. A cette époque, le but des recherches était de connaître l'homme dans ses fonctions et ses facultés. La vision était l'une de celle-ci, la question s'était posée : comment fait-on pour voir ?¹³²

¹³⁰ Simon G. *Le regard, l'être et l'apparence*, op. cit. p. 194.

¹³¹ Ibid. p. 167.

¹³² Ronchi V. *Histoire de la lumière*, op. cit. p. 7.

Les philosophes de l'Antiquité élaborent une théorie capable de venir à bout des interrogations sur la connaissance. Celle-ci trouve son point d'ancrage dans l'étude sensorielle. L'optique antique n'échappe guère aux lois philosophiques qui régissent la vie de leurs protagonistes. La logique interne de ce système de pensée ainsi mis en évidence montre à quel point il est impossible de rapprocher nos concepts actuels des idées développées par l'optique de l'Antiquité, tant la physique de l'époque paraît indissociable de la métaphysique qui la commande, elle-même intransposable :

L'optique [des philosophes grecs] n'est pas dans la pensée antique le germe d'un autre ordre de savoir, appelé à se développer de manière indépendante et qui mûrirait silencieusement dans un corps étranger. Bien au contraire, elle s'inscrit tout entière dans l'*épistémè* de l'Antiquité¹³³.

Nous souhaitons nous arrêter quelque peu sur cette idée d'absence de développement indépendant, afin de montrer que l'objet de l'optique antique n'est pas essentiellement physique, si tant est que l'on puisse surimposer au terme « physique » notre signification contemporaine.

2.1.2. L'optique de l'Antiquité, naissance d'une discipline multidimensionnelle

L'optique de l'Antiquité s'est structurée autour d'un noyau de disciplines que les sciences antiques ne distinguaient pas clairement, pas plus qu'elles ne les nommaient. Cette structuration était commandée par une métaphysique bien particulière. Ces disciplines qui occupent aujourd'hui des champs de connaissance distincts et que nous appelons la physique, la biologie et la psychologie, formaient à l'époque un *corpus* commun et indifférencié à partir duquel s'élaborèrent les théories de la connaissance, indissociables de l'étude des sens. Cette singularité n'a pas échappé au physicien Edwin Schrödinger. Selon lui, la compréhension (qui inclut celle de la vision), est le résultat du rassemblement de plusieurs domaines distincts de la connaissance au sein d'un schème descriptif unique :

Je pense que si la philosophie des anciens Grecs nous attire à l'heure actuelle, c'est parce que jamais avant elle ou après elle, jamais en aucun autre endroit du monde, on n'a établi quelque chose qui ressemble à son système très avancé et hautement structuré de connaissance et de spéculation, sans avoir recours à la division qui nous a gênée durant des siècles et qui est devenue insupportable de nos jours (...) Il n'y avait aucune limite quant aux sujets sur lesquels un homme instruit avait le droit, aux yeux de ses pairs, de donner

¹³³ Simon G. *Le regard, l'être et l'apparence*, op. cit. p. 201.

son opinion (...) L'idée d'une délimitation en compartiments étanches n'avait pas encore jailli¹³⁴.

Schrödinger poursuit en nous rappelant qu'une telle polyvalence disciplinaire était le signe d'une liberté de pensée sans précédent et qui n'eut sans doute plus cours par la suite :

A travers les tentatives sérieuses de nous replacer dans la situation intellectuelle des penseurs de l'Antiquité, qui sont certes beaucoup moins experts que nous en ce qui concerne le comportement effectif de la nature, mais qui ont également la plupart du temps beaucoup moins de préjugés, nous pouvons reconquérir grâce à eux, leur liberté de pensée. Cette liberté peut être utile, ne serait-ce que si on l'utilise, combinée à notre connaissance supérieure des faits, pour corriger les premières erreurs que les anciens ont commises et qui peuvent encore nous tromper à l'heure actuelle¹³⁵.

C'est cette liberté qui inscrit l'optique antique dans des perspectives d'études multiples et enchevêtrées, ne revendiquant aucune appartenance à tel ou tel champ de connaissance (biologique, physique ou psychologique), puisque ceux-ci sont inexistants en tant qu'objets indépendants.

Ainsi, l'optique de l'Antiquité, science de la vision, s'inscrit-elle au carrefour de champs de connaissance que nous n'avons aucun mal à différencier aujourd'hui, mais qui ne faisaient l'objet d'aucune distinction particulière à l'époque hellène. Certains historiens des sciences ont pourtant pris le parti d'analyser l'optique des anciens selon qu'elle développe des idées dans tel ou tel champ disciplinaire. A titre d'exemple, pour l'historien David Lindberg, l'optique de l'Antiquité peut être étudiée sous trois angles différents, suivant qu'elle appartient aux domaines médical, physique (ou philosophique) ou mathématique¹³⁶. Or selon nous, il est anachronique de séparer ainsi des domaines qui dans les écrits des philosophes ne l'étaient pas forcément. Euclide n'était pas exclusivement mathématicien, et son optique, même si elle est une géométrisation du regard, n'est pas strictement mathématique. Euclide ne se démarque pas de la tradition philosophique de son temps et considère son optique comme une réponse à une question qui n'a rien de mathématique. Si Empédocle, Démocrite, Platon et Aristote ont traité de l'optique de façon physique ou philosophique, il n'en demeure pas moins qu'ils ont également cherché à caractériser la nature biologique de l'œil. A titre d'exemple, Aristote reprend les idées avancées par Démocrite selon lesquelles l'œil serait

¹³⁴ Schrödinger E. *La nature et les Grecs* (1954), Seuil, 1992, 133-134.

¹³⁵ Schrödinger E. *Ibid.* p. 137.

¹³⁶ Lindberg D. *Theories of vision from Al Kindi to Kepler*, op. cit. p. 1.

constitué d'eau et non de feu, comme le pensaient Empédocle et Platon¹³⁷. Il justifie son opinion par les propos suivants :

La pupille, et l'œil en son entier, sont faits d'eau. Cela devient manifeste dès que l'on considère les faits eux-mêmes. Il apparaît en effet que ce qui s'écoule des yeux en état de décomposition, c'est de l'eau, que chez les tout jeunes embryons ce liquide est extrêmement froid et brillant, et que le blanc de l'œil chez les animaux sanguins est gras et huileux, cela afin que l'humidité de l'œil ne se solidifie pas¹³⁸.

Ces considérations pourraient aujourd'hui être classées sans équivoque dans un champ propre à ce que l'on nomme la biologie, mais font partie de ce que Schrödinger appellerait un « schème descriptif unique », une analyse générale dans laquelle il semble nécessaire d'unifier pour comprendre. Aussi paradoxal que cela puisse paraître aux yeux de notre science actuelle, on sera bien en peine de trouver de l'optique dans la *Physique* d'Aristote¹³⁹. En effet, l'objet de cette optique répond plus aux interrogations métaphysiques du philosophe, et les théories de la vision qui en sont le contenu même, trouvent naturellement leur place dans le traité *De l'âme* et dans *De la sensation et des sensibles*. Dans un contexte contemporain, l'objet de l'optique d'Aristote est plus psychologique que proprement physique, il appartient à cette science de l'objet naturel que Georges Canguilhem nomme la « para-physique »¹⁴⁰. Canguilhem note, à ce propos, qu'il est remarquable qu'une psychologie indépendante soit absente, en idée et en fait, des systèmes philosophiques de l'Antiquité et de ceux d'Aristote en particulier :

Le traité aristotélicien *De l'âme* est en réalité un traité de biologie générale, l'un des écrits consacrés à la physique (...). L'objet de la physique c'est le corps naturel et organisé ayant la vie en puissance, donc la physique traite de l'âme comme du corps vivant, et non comme substance séparée de la matière. De ce point de vue, une étude des organes de la connaissance, c'est-à-dire des sens extérieurs (les cinq sens usuels) et des sens intérieurs (sens commun, mémoire), ne diffère en rien de l'étude des organes de la respiration ou de la digestion (...) La science de l'âme est une province de la psychologie, en son sens originaire et universel de théorie de la nature »¹⁴¹.

¹³⁷ « Démocrite, quant à lui à raison de dire que l'œil est eau », Aristote, *De la sensation et des sensibles*, trad. P.M. Morel, Flammarion, 2000, 438a, 5-10.

¹³⁸ Aristote, *De la sensation et des sensibles*, op. cit. 438a.

¹³⁹ On trouvera bien une allusion à l'optique et en particulier au mécanisme de la vision dans les *Leçons de physique* d'Aristote, mais de façon tout à fait ponctuelle. A propos des sens Aristote rappelle « qu'il ne peut pas y avoir d'intermédiaire possible entre l'objet altéré et l'objet altérant. Dans tous les cas, l'extrémité altérante et le premier altéré sont dans le même lien. Si donc ce qui s'altère est altéré par des causes sensibles, il est clair aussi que, dans tous ces cas, l'extrémité dernière de ce qui altère se confond avec la première extrémité de ce qui est altéré. La couleur est continue à la lumière, et la lumière l'est à la vue », Aristote, *Leçons de physique*, trad. J. Barthélémy Saint Hilaire, Presses Pocket, Paris, 1990.

¹⁴⁰ Voir Canguilhem G. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, op. cit. p. 369.

¹⁴¹ Ibid. p. 368.

Et nous pourrions étendre notre réflexion à l'*Optique* de Ptolémée qui, malgré son titre prometteur d'une discipline ancrée dans ce que serait la physique d'aujourd'hui, demeure avant tout un ouvrage psychologique. L'*Optique* de Ptolémée n'est pas un traité sur la lumière (comme le furent les ouvrages homonymes postérieurs au 11^e siècle), mais constitue une référence de tout ce qui, dans la physique philosophique de l'époque, pouvait expliquer la sensation visuelle. Si ses lois de la réfraction y sont données en termes mathématiques, elles sont le résultat d'une étude avant tout psychologique de la vision. Le livre II de *L'Optique* débute ainsi :

Tout ce qui permet de relier les propriétés de la vue et de la lumière, pour qu'elles répondent l'une à l'autre, quelles sont leurs mutuelles similitudes, en quoi elles diffèrent dans leurs forces et leurs mouvements, ce qui appartient à chacune comme différence spécifique, et quels sont leurs accidents, nous l'avons exposé dans le livre précédent¹⁴².

Il s'agit bien là pour Ptolémée de s'attacher, de façon analogue à celle de ses prédécesseurs, à l'étude de la vision dans une perspective que nous qualifierions aujourd'hui de psychologique, et de chercher à relier la vue à l'âme. Les commentaires d'Albert Lejeune à propos de l'ouvrage de Ptolémée vont dans ce sens :

En psychologie, Ptolémée considère l'âme comme ressortissant aux trois éléments les moins matériels, l'air, le feu et l'éther : il admet qu'elle opère elle-même les sensations et que parmi les sens, la vue et l'ouïe sont les plus rapprochés de sa partie la plus noble¹⁴³.

Ainsi, même dans ses heures tardives, y compris lorsqu'elle établit les lois géométriques de la réfraction, l'optique de l'Antiquité reste une science de la vision, intégrant des dimensions plus psychologiques que proprement physiques. L'optique n'est pas étudiée par les philosophes de l'Antiquité à l'intérieur de disciplines cloisonnées. Nous ne pensons donc pas qu'il existe alors une optique biologique, ou mathématique et encore moins physique. Par conséquent, étudier l'optique antique pour sa physique (si tant est que l'on prenne ce terme au sens qu'on lui donne aujourd'hui), relèverait du plus bel anachronisme et réduirait considérablement les théories des Anciens. L'objet de l'optique antique n'est pas l'étude d'un concept physique unanimement reconnu et construit. En revanche, elle s'organise de façon consensuelle autour d'une analyse multidimensionnelle de la vision. L'optique de l'Antiquité

¹⁴² Ptolémée cité par Gérard Simon, op. cit. p. 84.

¹⁴³ Albert Lejeune, *Euclide et Ptolémée, deux stades de l'optique géométrique grecque*, Publication de l'Université de Louvain, 1948, p. 65.

évolue au milieu d'une liberté de variations. Mais cette optique, en cessant d'être antique perd ses dimensions multiples.

Ce chevauchement des disciplines qui n'a plus cours aujourd'hui induit de façon connexe une superposition de sens pour un terme unique. Ainsi, dans le contexte hellène, le mot lumière est-il polysémique alors que la physique d'aujourd'hui lui confère une signification bien précise. Et ce n'est pas parce que le mot *phaos* est utilisé par plusieurs penseurs de l'optique de l'Antiquité qu'il renvoie nécessairement à des idées semblables. A ce propos, le philosophe Georges Canguilhem nous invite à replacer chaque terme dans son contexte particulier de recherche afin d'éviter toute erreur d'interprétation :

L'attention aux obstacles épistémologiques va permettre à l'histoire des sciences d'être authentiquement une histoire de la pensée. Elle gardera l'historien de la fausse objectivité qui consiste à dresser l'inventaire de tous les textes dans lesquels à une époque donnée, ou à des époques différentes, apparaît le même mot, dans lesquels des projets de recherches semblables paraissent s'exprimer dans des termes substituables. Un même mot n'est pas un même concept. Il faut reconstituer la synthèse dans laquelle le concept se trouve inséré, c'est-à-dire à la fois le contexte conceptuel et l'intention directrice des expériences ou observations.¹⁴⁴

En prêtant une attention particulière aux différentes significations du mot *phaos* dans l'Antiquité, nous pourrions entreprendre une archéologie de la vision particulière.

2.1.3. Des termes uniques et polysémiques

L'affirmation de Canguilhem selon laquelle « un même mot n'est pas un même concept », peut s'appliquer à deux niveaux distincts, selon que l'on considère les termes de l'Antiquité entre eux, sur un même plan temporel, ou selon que l'on compare les termes propres à plusieurs systèmes de pensée temporellement disjoints tels que ceux de l'optique de l'Antiquité et de l'optique contemporaine.

Commençons par les systèmes de pensée disjoints. On observe qu'il existe bien une incompatibilité conceptuelle entre le vocabulaire de l'optique antique et celui de notre physique. En reprenant les théories philosophiques de Kuhn, on peut affirmer que ces optiques sont incommensurables :

¹⁴⁴ Canguilhem G. *Etude d'histoire et de philosophie des sciences*, op. cit. p. 179.

Les deux partis voient de manière différente les situations auxquelles ils font tous deux appel, et ce faisant, puisque le vocabulaire dans lequel ils discutent se compose des mêmes termes, ils doivent établir entre ces termes et la nature, un rapport différent¹⁴⁵.

Il y a donc de grandes chances pour que la signification de nos termes scientifiques actuels ne corresponde pas au sens que les grecs souhaitaient leur donner. A ce sujet, le philosophe Willard Quine élabore la théorie de ce qu'il appelle « l'indétermination de la traduction »¹⁴⁶ : l'évolution de la science est un processus de traduction d'un schème conceptuel vers un autre, « un processus qui n'est ni transitif, ni réversible »¹⁴⁷. Selon Quine, la science évolue sur le modèle de la traduction ; chacune de ses étapes est une traduction de la précédente, une traduction indéterminée qui ne peut être assurée par des significations stables. Par conséquent, l'adoption d'un nouveau schème conceptuel implique que l'on attribue de nouvelles significations aux mots anciens. Et c'est parce que la traduction est indéterminée qu'elle transforme le schème conceptuel en un langage nouveau:

Lorsque quelqu'un adopte une logique dont les lois sont ostensiblement contraires aux nôtres, nous pouvons conjecturer qu'il ne fait que donner de nouvelles significations à de vieux vocables familiers¹⁴⁸.

Sans adopter une position aussi extrême que celle de Quine, nous pouvons néanmoins remarquer que le mot « lumière » revendiqué par la physique contemporaine est un « vieux vocable » dont la signification actuelle est inscrite dans une logique paradigmatique bien différente de celle des Anciens. Par conséquent, la « lumière » de l'Antiquité ne fait pas partie du même schème conceptuel que la « lumière » de la physique contemporaine et, possède une signification nouvelle et intransposable à celle de l'Antiquité.

Le problème de l'indétermination de la traduction est encore plus ardu, lorsque ces théories ne sont pas exprimées dans des langues identiques. Ainsi nous faut-il par exemple tenir compte de l'imprécision due à la traduction en français moderne de termes grecs anciens, comme de l'anachronisme dont certains choix d'expressions peuvent être porteurs. Le fait que les termes

¹⁴⁵ Kuhn T. *La structure des révolutions scientifiques*(1962), Flammarion, Paris, 1970, p. 269. Une théorie est dite incommensurable à une autre lorsqu'elle utilise de nouveaux concepts ou des concepts anciens dotés d'un rôle nouveau.

¹⁴⁶ Quine W. *Relativité de l'ontologie et autres essais* (1969), cité par Sandra Laugier-Rabaté, *L'anthropologie logique de Quine*, Vrin, 1992, p. 226.

¹⁴⁷ Laugier-Rabaté S. *L'anthropologie logique de Quine*, op. cit. p. 225.

¹⁴⁸ Quine W. cité par Sandra Laugier-Rabaté, op. cit. p. 206.

de l'optique antique ne soient pas transposables à notre optique rend la tâche de la traduction particulièrement délicate. Vasco Ronchi l'explique très clairement en introduction de son *Histoire de la lumière* :

Les rares textes originaux sont très fragmentaires et les philologues se trouvent souvent en face de véritables rébus quand ils doivent interpréter des termes au sens mal défini ou trop large. Termes que les auteurs ont utilisés dans un sens précis et plus restreint que leur sens philologique et étymologique actuel, le seul dont disposent traducteurs et commentateurs modernes. Ces derniers se trouvent donc dans des conditions plus défavorables que celles dans lesquelles travaillerait le traducteur d'un texte scientifique qui n'aurait aucune connaissance technique du sujet traité. Il arrive que l'on ait à traduire des termes si 'élastiques' qu'on peut ou non y voir un concept, suivant la bonne ou la mauvaise volonté de l'interprète. »¹⁴⁹

Afin d'éviter toute confusion, il serait peut-être judicieux d'éviter la traduction de certains concepts historiques afin de ne pas leur imprimer une signification contemporaine inadaptée¹⁵⁰.

Pour des raisons entre autres contextuelles, il semble donc particulièrement délicat de surimposer aux termes spécifiques d'une époque un vocabulaire certes identique, mais dont l'acception rationnelle contemporaine est incompatible. Il est sans doute périlleux de traduire le *phaos* grec par notre terme lumière. A cette première difficulté, que nous désignerons par les termes d'« incommensurabilité lexicale externe », (elle concerne deux systèmes de pensée extérieurs l'un de l'autre : celui des savants de l'Antiquité et celui des physiciens contemporains), vient s'ajouter un second embarras dû à la multiplicité des sens d'un même terme pour une époque donnée, qui sont parfois, selon nos critères scientifiques contemporains, incommensurables entre eux. Nous parlerons alors d'« incommensurabilité lexicale interne ». A titre d'exemple, dans le dictionnaire Grec-Français *Bailly*, le mot *phaos*

¹⁴⁹ Ronchi V. *Histoire de la lumière*, op. cit. p. 3.

¹⁵⁰ L'analyse proposée par Jean Rosmorduc au sujet de la notion *d'impetus* nous semble particulièrement intéressante. Rosmorduc remarque que le terme *impetus* a été conservé en l'état par les différents historiens de la mécanique : « Contrairement à d'autres termes latins utilisés par les savants du Moyen Age ou de l'Antiquité, celui-ci [*impetus*] n'a pas reçu de traduction moderne. Dans toutes les histoires de la physique, le mot initial reste. C'est que, en vérité, il est difficile à traduire. Compte-tenu de ce qu'il exprime, on peut penser à « quantité de mouvement », ou à « impulsion ». Mais ces deux concepts ont, en mécanique classique, des significations très précises qu'il serait erroné d'attribuer à celui de Buridan. Le terme 'élan', qui n'a aucun contenu scientifique précis, pourrait éventuellement être utilisé mais aucun historien des sciences, pour l'instant, n'en a vu la nécessité. Impetus a historiquement une signification précise, reconnue par tous, et il est en effet sans doute préférable de le conserver ». Rosmorduc J. Histoire et pédagogie de la mécanique, in. *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n° 8, novembre 1978, p. 31.

est traduit de sept façons différentes¹⁵¹. Cela semble correspondre à une certaine défaillance conceptuelle qui n'est plus d'actualité dans la physique d'aujourd'hui, puisque le concept de lumière fait l'objet d'un *consensus* absent des théories optiques antiques. Chaque expression ainsi désignée sous le même label ne représente pas le même objet : la lumière des yeux n'est pas identique à celle des flambeaux.

Afin d'illustrer notre modèle d'incommensurabilité lexicale interne, nous souhaitons nous arrêter sur un célèbre passage du traité *De la sensation et des sensibles*, dans lequel Aristote critique vivement les idées d'Empédocle et de Platon en leur reprochant de vouloir faire jaillir la lumière de l'œil, tel un flambeau dans la nuit :

Car si vraiment l'œil était du feu, comme Empédocle le prétend et ainsi qu'il est écrit dans le *Timée*, et si la vision se produit parce que de la lumière [φῶς] sort, comme d'une lanterne, pourquoi donc la vue ne s'exercerait-elle pas dans l'obscurité ?¹⁵²

Nous souhaitons montrer notre étonnement quant au fait qu'Aristote attribue à ses prédécesseurs de telles idées, et nous avons de fortes raisons de croire que nous nous trouvons face à un malentendu conceptuel ou tout au moins lexical, ce qui n'a rien d'étonnant au vu des nombreuses significations de chacun des termes spécifiques à l'optique antique. Aristote s'est-il laissé prendre au piège de l'élasticité des termes de son époque ? La défaillance de *consensus* conceptuel est sans doute à l'origine de ce que nous pourrions qualifier de méprise lexicale. Il ne fait guère de doute que ni Platon, ni Empédocle, Euclide ou Ptolémée, n'ont imaginé leurs yeux tels des flambeaux capables d'envoyer leur propre lumière. Une telle conception défie tout autant les théories empiristes que rationalistes. A l'image de ce que nous avons pu dire du « φῶς » grec, le terme « πῦρ » fait lui aussi l'objet de nombreuses traductions¹⁵³. Et si nous reprenons le fragment d'Empédocle qu'Aristote cite en intégralité, nous pouvons en donner plusieurs traductions différentes, dans lesquelles le terme « πῦρ » est

¹⁵¹ On citera pour mémoire les traductions suivantes : lumière du Soleil, lumière du jour, lumière des étoiles et de la lune, éclair, lumière du feu, lumière des flambeaux, lumière des yeux. Dictionnaire Bailly, p. 2112. Ou encore, terme signifiant à la fois : l'aspect offert par un objet à un spectateur ; l'action de voir, la perception visuelle, l'organe de la vue, le flux visuel rayonné par l'œil ou le rayon visuel isolé ; une apparition, un fantôme, un spectre. Cf. Charles Mugler, Dictionnaire historique de la terminologie optique des Grecs, Klincksieck, Paris, 1964.

¹⁵² Aristote, *De la sensation et des sensibles*, op. cit. 437b.

¹⁵³ Citons à titre d'exemple les significations suivantes : feu, lumière rayonnée par les astres, lumière rayonnée par les yeux, flamme, feu rayonné par les corps, lumière rayonnée par la Lune, voir Mugler C. *Dictionnaire historique de la terminologie optique des grecs*, Klincksieck, Paris, 1964, p. 339.

tantôt une flamme, une substance qui sort des yeux, etc. Ce qui ne signifie pas que la substance qui sort des yeux est une flamme identique à celle du feu d'une torche. Elle lui est parente, en ce sens qu'elle permet de voir, et qu'elle appartient au genre ignée, comme nous l'avons précédemment évoqué¹⁵⁴ :

Comme celui qui, songeant à sortir, s'arme d'une lampe,
Par une nuit de mauvaise saison, lumière d'un feu (πυρ) brûlant,
Allumant contre les vents de toutes sortes sa lanterne protectrice
Qui disperse le souffle des vents régnants,
Tandis que le feu (πυρ) surgit au dehors, aussi loin qu'il puisse se porter,
Et brille au-delà du seuil de ses rayons invincibles.
De même, le feu [πυρ] primitif s'est jadis enclos dans de fines membranes,
A engendré la pupille ronde dans ses toiles subtiles
Qui ont été transpercées droit de conduits merveilleux
Et ces tissus retenaient l'eau profonde qui s'écoulait autour de la pupille
Tout en laissant passer le feu [πυρ], aussi loin qu'il puisse se porter¹⁵⁵.

L'idée qu'Aristote ait pu proposer une lecture déformée de la pensée de ses prédécesseurs nous est apparue en étudiant quelques conceptions d'enfants sur la vision, de la même façon que Kuhn aurait pu le faire¹⁵⁶. A la suite d'entretiens individuels nous avons constaté que les enfants de maternelle et de collège expliquent majoritairement la vision par un quelque chose émis depuis l'œil vers l'objet à regarder. Ce quelque chose fait l'objet de dénominations diverses telles que « le regard », « la vue », « la vision »... qui ne désignent jamais des entités de nature lumineuse. En d'autres termes, les enfants ne considèrent par leurs yeux comme des lanternes, pas plus que ne le faisait, nous semble-t-il, un savant hellène¹⁵⁷. D'ailleurs, ils reconnaissent qu'il est impossible de voir dans le noir, et l'on sait par ailleurs qu'Empédocle en était également convaincu¹⁵⁸. Contrairement à ce que peuvent penser certains concepteurs

¹⁵⁴ Si nous étions plus radical, nous reprendrions à notre compte une phrase de Johannes Kepler dans laquelle il reproche à Aristote d'être bien peu scrupuleux à l'égard de ses prédécesseurs : « Il est fréquent qu'Aristote réfute les anciens sans fondement, en donnant une présentation déformée de leurs thèses », Kepler J. *Paralipomènes à Vitellion*, 1604, p. 369.

¹⁵⁵ Empédocle, cité par Aristote *De la sensation et des sensibles*, p. 69. Voir également la traduction proposée par Jean Bollack, dans laquelle πυρ est par deux fois traduite par « flamme », de même que dans celle de Jean Voilquin.

¹⁵⁶ « Une partie de ce que je sais sur la manière de poser des questions à des savants disparus, je l'ai appris en examinant les interrogatoires de Piaget avec des enfants vivants ». Kuhn T. *La Tension essentielle*, op. cit. p. 56. Voir Introduction.

¹⁵⁷ Voir à ce sujet, de Hosson C. et Kaminski W. Les Yeux des enfants sont-ils des « porte-lumière » ? in *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique Chimie*, vol. 96, Janvier 2002.

¹⁵⁸ « Car l'air de la nuit d'Empédocle, comme il est obscur, tout le privilège qu'il enlève aux yeux comme organes de perception, il le rend par les oreilles », Plutarque, cité par Bollack J. Empédocle, tome 2 fragments (1969), Gallimard, Paris, 1992, p.114.

de programmes, pour qui « il convient d'insister sur le sens propagation de la lumière afin de supprimer l'idée fausse d'un cheminement à partir de l'œil »¹⁵⁹, il n'existe pas de conceptions pré-scientifiques dans lesquelles voir revient à envoyer de la lumière avec ses yeux. En revanche, les dénominations pré-scientifiques sont sans doute aussi nombreuses que les significations des termes antiques utilisés pour désigner ce qui sort des yeux. Il est peut-être plus simple pour certains de réduire cette multiplicité lexicale à un terme unique : « lumière », alors que ce terme, pris au sens de ce qui est émis par les sources lumineuses, est incommensurable avec ceux des représentations pré-scientifiques. Et même lorsque le terme « lumière » est effectivement utilisé pour désigner ce qui sort des yeux, il convient sans doute de le comprendre dans le sens métaphorique de « regard », que dans le sens de ce qui éclaire. A ce titre, les yeux « porte-lumière » de Platon ne sont pas des flambeaux. Et le problème n'est guère différent lorsqu'il s'agit d'explicitier les idées d'Empédocle. Ainsi, parmi les nombreuses significations du terme $\pi\upsilon\rho$, Aristote a peut-être choisi celui qui s'éloignait le plus de la pensée empédocléenne.

Le vocabulaire antique de la vision n'a pas été élaboré à l'intérieur d'une discipline unique afin de répondre à des contingences de raisonnement particulières ainsi que cela peut être le cas dans notre physique contemporaine. Comme nous l'indique Charles Mugler, ce vocabulaire est souvent emprunté à la poésie, en particulier celle à d'Homère. Mugler l'exprime en ces termes :

Un grand nombre de représentations sur lesquelles les théoriciens ont fondé l'édifice de la science optique des grecs se rencontrent chez les poètes (...) de façon qu'on peut dire que chez les Grecs, l'optique scientifique élaborée par une élite de penseurs est fondée sur une optique populaire faite de l'ensemble des observations et des intuitions de toute une nation¹⁶⁰.

L'optique de l'Antiquité évolue dans une liberté de pensée expurgée de toute contrainte disciplinaire. Elle est une science de la vision qui revendique un vocabulaire aux significations variées intransposables à notre science actuelle.

¹⁵⁹ *Bulletin officiel de l'Education Nationale*, n°44, décembre 2002.

¹⁶⁰ Mugler C. *Dictionnaire historique de la terminologie optique des grecs*, op. cit. p. 8.

2.1.4. La controverse du « sens » de la vue dans l'optique de l'Antiquité

A la lecture des œuvres et des témoignages laissés par les protagonistes de l'optique de l'Antiquité, il nous semble peu judicieux de proposer une présentation de leurs idées suivant un ordre chronologique. Si elles furent nombreuses, elles ne se succédèrent pas linéairement suivant un ordre temporel établi, mais furent, pour autant que l'on puisse admettre une approximation de quelques années, contemporaines les unes des autres. Dans ce contexte, deux théories s'opposent. La première, celle de l'intromission, explique la vision par l'entrée dans l'œil de quelque chose issu de l'objet. La deuxième, celle de l'extramission, est représentée par les savants qui pensent que la vision résulte de l'envoi par l'œil de quelque chose vers l'extérieur. Il existe une théorie alternative, celle d'Aristote, qui nous semble être à la base de la rupture opérée par Alhazen au 11^e siècle.

Les théories émanantistes ou intromissionnistes

Du point de vue des théories développées par les épicuriens et les atomistes¹⁶¹, les objets diffusent continuellement leurs répliques ou *eidola* dans toutes les directions. Celles-ci traversent l'air en ligne droite en conglomerats d'atomes, conservant l'orientation, la forme et la couleur de l'objet dont elles sont issues. Pour Leucippe, la vision d'un objet s'explique par la réception dans l'œil de ces répliques qui convoient toutes les qualités visibles de cet objet :

Comme notre âme ne sort pas de nous pour aller toucher les objets extérieurs, il faut donc que ces objets viennent eux-mêmes toucher notre âme, en passant par les sens. Or, nous ne voyons pas les objets s'approcher de nous quand nous les percevons ; il faut au moins qu'ils envoient à notre âme quelque chose qui les représente, des images, *eidola*, espèces d'ombres ou de simulacres matériels qui enveloppent les corps, voltigent à leur surface et peuvent s'en détacher pour apporter à notre âme les formes, les couleurs et toutes les autres qualités des corps d'où ils émanent¹⁶².

Les idées développées par Epicure ou par Lucrèce sont très proches des celles développées par Leucippe. Ainsi, pour Lucrèce :

¹⁶¹ Voir en particulier Leucippe de Milet, Démocrite, Epicure et plus tard, Lucrèce. Précisons que ces différents auteurs préfèrent au terme « réplique », ceux de « simulacre », « idoles », « écorces » ou encore « effigies ».

¹⁶² Leucippe de Milet, cité par Vasco Ronchi, *Histoire de la lumière*, op. cit. p. 6.

Des figures et des images subtiles sont émises par les objets, et jaillissent de leur surface : ces images, donnons-leur par à peu près le nom de membrane ou d'écorce puisque chacune d'elle a la forme et l'aspect de l'objet dont elle émane pour errer dans l'espace¹⁶³.

Les conceptions de Démocrite sont certes plus complexes mais elles obéissent également aux principes intromissionnistes de l'atomisme¹⁶⁴, de même que celles d'Empédocle¹⁶⁵. Dans la pensée intromissionniste, la lumière n'est pas nécessaire à l'exercice de la vue. En effet, pour les épicuriens, la lumière ne fait qu'arracher plus vigoureusement les simulacres le jour ; mais parfois, en son absence, certains se détachent encore, apportant à l'âme ses rêves nocturnes :

De tous les objets il existe ce que nous appelons les simulacres : sortes de membranes légères détachées de la surface des corps, et qui voltigent en tout sens parmi les airs. Et dans la veille comme dans les rêves, ce sont ces mêmes images dont l'apparition vient jeter la terreur dans nos esprit¹⁶⁶.

Les théories immanentistes ou extramissionnistes

La position conceptuelle alternative à la théorie de la copie de l'objet naquit de la pensée pythagoricienne. Empédocle, que nous avons évoqué précédemment, mais aussi Euclide, Hipparque et Ptolémée expliquent la vision par l'émission depuis l'œil d'un flux visuel. Ce flux visuel, sorte de matérialisation du regard, est géométrisé par Euclide. Il est constitué d'un ensemble de rayons circonscrits à l'intérieur d'un cône de vision dont le sommet est situé dans l'œil et la base sur la surface de l'objet à regarder. L'œil émet des rayons invisibles, les « rayons visuels » qui entrent en contact avec l'objet, provoquant alors une sensation

¹⁶³ Lucrèce, *De rerum natura*, livre IV, trad. A. Ernout, Les Belles Lettres, 1985, 44-53.

¹⁶⁴ Pour Démocrite, il y a une émission qui part de l'objet, mais cette émission ne pénètre pas dans l'œil, elle forme dans l'air une « impression » analogue à l'empreinte d'un objet sur la cire. Cette impression étant dure, pénètre la matière molle de l'œil et apparaît comme image sur la pupille. C'est cette image que l'homme voit : « La vision, d'après Démocrite, se produit par l'image ; mais sur celle-ci il a une opinion particulière, car il ne la fait pas produire directement sur la pupille, mais l'air, entre l'œil et l'objet, recevrait une conformation en se resserrant sous l'action de l'objet vu et du voyant ; car toute chose émet constamment une certaine effluve. Puis cet air, ayant ainsi pris une forme solide et une couleur différente, fait image dans les yeux humides ; car ce qui est dense ne le reçoit pas, ce qui est humide le laisse pénétrer. Aussi les yeux mous sont-ils meilleurs pour voir que les durs ; il faut que la tunique extérieure soit aussi mince et aussi résistante que possible, que l'intérieur de l'œil soit très mou, sans chair serrée et dense, même sans liquides épais et gras, qu'enfin les veines dans les yeux soient droites et vides de façon à prendre une forme semblable à l'effigie, car quelque chose est surtout connu par les pareilles », cité par Jean Voilquin, *Les penseurs grecs avant Socrate*, Flammarion, 1964, 193-194.

¹⁶⁵ Empédocle explique la vision différemment suivant qu'il la situe sous le régime de la Haine ou celui de l'Amour, deux forces qui selon lui, combinent diversement les Quatre Eléments. Ainsi, sous le régime de la Haine, l'œil reçoit une émanation de la part de l'objet : « Sachant que de tout ce qui existe il provient des émanations », tandis que sous le régime de l'Amour, l'œil envoie un feu visuel à la rencontre de l'objet. Empédocle, cité par Jean Voilquin, *Les penseurs grecs avant Socrate*, op. cit.

¹⁶⁶ Lucrèce, *De Rerum natura*, op. cit. livre IV, 33-40.

visuelle¹⁶⁷. Le courant platonicien se démarque quelque peu des théories extramissionnistes. Pour Platon, l'émission provenant des yeux, le « feu visuel », se combine avec la lumière externe environnante pour former un intermédiaire entre l'œil et l'objet. La vision se produit lorsque cette coalescence de « feu visuel » et de lumière du jour entre en contact avec l'émission d'un objet. L'émission platonicienne n'est pas une réplique, mais de la couleur :

Les premiers organes qu'ils [les dieux] fabriquèrent furent les yeux porte-lumière ; ils les fixèrent sur le visage dans le but que je vais dire. De cette sorte de feu qui a la propriété de ne pas brûler et de fournir une lumière douce, ils imaginèrent de faire le propre corps de chaque jour, et le feu pur qui est en nous, frère de celui-là, ils le firent couler par les yeux en un courant de parties lisses et pressées. (...) Lors donc que la lumière du jour entoure le courant de la vision, le semblable rencontre le semblable et se fond avec lui pour former, dans la direction des yeux un seul corps, partout où le rayon sorti du dedans frappe un objet qu'il rencontre à l'extérieur. (...) Mais quand le feu parent du feu intérieur se retire à la nuit, celui-ci se trouve coupé de lui ; comme il tombe sur des êtres d'une nature différente, il s'altère lui-même et s'éteint...¹⁶⁸

L'analyse que nous avons proposée des idées d'Empédocle peut s'appliquer en termes identiques à la théorie de Platon dans laquelle les « yeux porte-lumière » ne sont pas des flambeaux : la théorie platonicienne de la vision n'est pas celle d'une émission de lumière depuis l'œil, si l'on prend le mot lumière au sens de ce qui est émis par les sources lumineuses¹⁶⁹.

Un des traits les plus remarquables de ces raisonnements extramissionnistes, c'est que la substance qui sort des yeux, ce « rayon visuel », semble procéder d'une véritable matérialisation du regard dont Simon nous donne quelques caractéristiques :

La vue nous livre directement ce qui est. Elle va, au contact des choses, s'imprégner de leur couleur, s'appuyer sur leur position, se mouler sur leur relief, sentir glisser leur mouvement¹⁷⁰.

¹⁶⁷ Voir trois premiers postulats d'Euclide cités plus haut.

¹⁶⁸ Platon, *Timée*, trad. E. Chambry, Gallimard, 1969, 45a.

¹⁶⁹ Nous le savons, la terminologie optique de l'époque ne va pas dans le sens d'un unique terme désigné sous le nom de « lumière ». Et s'il existe bien une communauté de nature du « feu intérieur » platonicien avec la lumière, ce feu ne lui est pas identique puisqu'à la nuit tombée, il ne prend pas le relais de « la lumière du jour » : au contraire, « il s'altère et s'éteint ». Encore une fois la théorie platonicienne de la vision n'est pas une théorie de l'émission de la lumière (pris au sens de ce qui éclaire) par l'œil. Aujourd'hui encore, le mot lumière est parfois utilisé pour désigner l'entité qui sort de l'œil, et nous avons toutes les raisons de croire que la lumière n'est pas prise au sens de ce qui éclaire. Dans un entretien récent au *Nouvel Observateur*, le philosophe Jean Baudrillard explique la notion d'image en ces termes : « J'aime bien la formule selon laquelle l'image est au confluent de la lumière venue de l'objet et de la lumière venue du regard. Or nous n'avons plus de réalité, et notre regard constamment mobilisé n'a pas la distance nécessaire : l'absence d'objet et de regard, il n'y a pas d'image. ». Propos recueillis par I. Violante, in *Le nouvel observateur*, hors-série n°55, juillet-août 2004, 8-9.

¹⁷⁰ Simon G. *Le Regard, l'être et l'apparence* op. cit. p. 192.

Hipparque ira jusqu'à penser le rayon visuel comme une excroissance tactile de l'œil analogue à une main tendue¹⁷¹. Ainsi, pour Hipparque, la vision est-elle le résultat d'un processus par contact par lequel l'entité qui sort de l'œil est assimilée à un pseudopode sensitif.

Dans un esprit tactile analogue, les stoïciens comparent la vision à l'usage qu'un aveugle fait de sa canne en introduisant la notion de *pneuma*. En présence de lumière, une substance sort de l'œil et stimule l'air situé entre l'œil et l'objet à regarder. Sous l'effet de ce *pneuma*, l'air se tend comme une baguette et forme un cône dont le sommet se trouve dans l'œil. Les objets rencontrés par la base du cône sont alors perçus et rapportés à l'œil par l'air comprimé, comme sous l'effet d'une baguette rigide comme le rapporte Alexandre d'Aphrodise :

Certains expliquent la vision par la tension de l'air. L'air en contact avec la pupille est excité par la vision et se transforme en un cône dont la base est impressionnée par l'objet de la vision. La perception résulte d'un procédé identique à celui du toucher par l'intermédiaire d'un bâton¹⁷².

Dans cette théorie, c'est bien la lumière (prise dans le sens de la clarté du jour) qui permet que s'établisse un lien entre l'œil et l'objet. Sans lumière, le pouvoir visuel, le *pneuma*, ne peut tendre l'air. Ainsi, dans le noir, le contact n'est pas possible parce que l'air cesse de servir de canne permettant de « toucher » l'objet. Sous les effets conjugués de la lumière et du *pneuma*, l'air devient une excroissance tactile et sensible de l'œil. Cette idée stoïcienne de la vision est évoquée par Diogène Laërce en ces termes :

La chose vue nous est rapportée par l'intermédiaire de l'air projeté vers elle, de la même façon que le ferait un bâton¹⁷³.

Cette théorie sera formalisée par Galien, qui propose au 2^e siècle après J.C. la première approche médicale de la vision. Il parvient notamment à associer sa connaissance de l'anatomie de l'œil avec la théorie du *pneuma*. Pour Galien, le *pneuma* voyage vers les yeux par les nerfs optiques qui doivent être par conséquent creux. Arrivé dans les yeux, le *pneuma*

¹⁷¹ Aetius, *Doxographi graeci*, Berlin 1879, in. H diels ed, p.404, IV, 13, 8-12.

¹⁷² Alexandre d'Aphrodise, cité par David Lindberg, *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. p. 10. Notre traduction.

¹⁷³ Diogène Laërce, cité par David Park, *The fire within the eye*, Princeton University Press, 1997, p. 44. Notre traduction. Laërce était un compilateur, par qui l'on connaît d'innombrables auteurs antiques dont tout ou presque est perdu. Ces écrits sont un mélange de citations et de paraphrases des Anciens.

remplit le cristallin et passe à travers la pupille. A son contact et en présence de lumière, l'air se trouve altéré pour devenir une extension sensorielle de l'œil¹⁷⁴. Cette extension est géométrisée par Galien sous la forme d'un cône constitué de lignes visuelles dont le sommet se trouve dans la pupille de l'œil et la base sur l'objet visible.

Les idées des anciens à propos de la vision sont guidées par une nécessité philosophique d'identifier un lien matériel entre un agent (ici l'objet) et un patient (l'œil). En l'occurrence l'agent de la vue qui, physiquement invisible, est matérialisé soit par une réplique identifiée à l'objet lui-même (il en possède sa forme, sa couleur, sa taille, et il est toujours envisagé dans sa globalité), soit par une entité quasi matérielle émise par l'œil.

Les théories primitives de la vision : des processus par contact

A l'exception des idées d'Aristote, toutes les théories antiques de la vision obéissent à un cadre philosophique qui impose que les sensations soient le résultat d'une action par contact. Ainsi, les deux théories prédominantes de la vision - intromissionniste d'une part (celle des *eidola*), extramissionniste d'autre part (celle du flux visuel) - se caractérisent par une approche tactile qui explique la vision en termes de contact mécanique. Pour les Grecs (à l'exclusion d'Aristote), le problème essentiel est de déterminer comment l'œil peut établir un contact à distance avec l'objet, étant donnée l'absence de continuité physique apparente :

La conception grecque de la vision fut influencée par celle du toucher, selon laquelle la connaissance sensorielle dépendait entièrement d'un contact physique entre l'objet et le corps de l'observateur¹⁷⁵.

Les théories grecques apparaissent donc comme une série de tentatives pour découvrir les moyens du contact entre l'œil de l'observateur et l'objet visible, en analogie avec le sens du toucher, comme en témoignent ces propos de Leucippe de Milet :

Toute modification produite ou reçue a lieu en vertu d'un contact ; toutes nos perceptions sont tactiles, tous nos sens sont des espèces de toucher¹⁷⁶.

¹⁷⁴ Galien se trouve conforté dans cette idée par la connaissance qu'il a des cataractes. Il pense que celles-ci obscurcissent la vue car elles apparaissent entre le cristallin et la cornée. En outre, il constate que leur ablation ramène la vue. Il en conclut qu'elles bloquent le passage du *pneuma* entre le cristallin et l'air extérieur. Voir D. Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. 9-17.

¹⁷⁵ Russel G. *Histoire des sciences arabes*, tome 2, p. 320.

Comme pour le toucher, la perception visuelle est, pour l'optique hellène, le résultat immédiat de l'une ou l'autre forme de contact. Ainsi, les possibilités logiques explorées par l'optique de l'Antiquité impliquent soit la médiation d'une réplique se projetant de l'objet vers l'œil, soit l'existence d'un *quid* projeté depuis l'œil vers l'objet. En fait, il manque à l'optique de l'Antiquité non seulement un objet mais aussi un champ disciplinaire indépendant. En d'autres termes, une lumière conceptualisée inscrite dans une physique clairement délimitée. C'est pourquoi les penseurs grecs peuvent se laisser aller à des théories aussi nombreuses que différentes. Kuhn en est bien conscient lorsqu'il écrit qu'aucune école ne dispose avant Newton de paradigme uniformément accepté :

A aucun moment, de la haute Antiquité, à la fin du 17^e siècle, il n'y eut de théorie unique généralement acceptée sur la nature de la lumière, mais au contraire, plusieurs écoles et cénacles concurrents, dont la plupart adoptaient telle ou telle variante de la théorie épicurienne, aristotélécienne ou platonicienne (...). Chaque école puisait son autorité dans ses rapports avec une métaphysique particulière et chacune insistait, dans ses observations paradigmatiques, sur le groupe particulier de phénomènes optiques que sa théorie pouvait expliquer avec le plus de succès¹⁷⁷.

Les théories antiques de la vision se situent dans un contexte très limité, autour d'un « groupe particulier de phénomènes optiques », et cherchent uniquement et exclusivement à expliquer le lien qui existe entre l'œil et l'objet vu. Dans les contingences fixées par les théories atomistiques, les penseurs y parviennent de façon satisfaisante, « avec succès », nous dirait Kuhn, sans se soucier de ce qui est extérieur au système « œil-objet ». Ils se satisfont d'une explication qui répond à leurs interrogations, dans le contexte de leur propre métaphysique, de leur propre paradigme, libérés des exigences imposées par une rationalité unique et uniforme. C'est cette « liberté », chère à Schrödinger, qui permet l'émergence dans l'histoire de l'optique de tant de spéculations à propos de la vision, et que nous retrouverons dans la pensée pré-scientifique. Les théories intromissionnistes en sont une illustration ; celles des extramissionnistes également.

¹⁷⁶ Leucippe de Milet, cité par Vasco Ronchi, *Histoire de la lumière*, op. cit. p. 6.

¹⁷⁷ Kuhn T. *La structure des révolutions scientifiques* op. cit. p. 32.

Les théories aristotéliennes de la vision

Au-delà des théories antagonistes que nous venons de présenter et qui constituent ce que nous appellerons par la suite la controverse du « sens » de la vue, Aristote propose une théorie alternative dans laquelle émerge l'idée d'un agent intermédiaire et indépendant. Les théories aristotéliennes de la vision relèvent certainement de l'intromission. Mais leur spécificité nous amène à en proposer une étude indépendante.

Contrairement à ce que nous avons pu dire de la théorie du rayon visuel, du *pneuma*, ou de celle des *eidola*, la démarche d'Aristote ne semble pas relever d'un processus tactile. Pour lui, l'œil n'entre pas en contact avec les objets visibles par sa propre action, c'est-à-dire par l'envoi d'un rayon tactile, pas plus qu'il ne reçoit de copies des objets qui l'entourent. Comme pour toutes les sensations, Aristote explique la vision par un processus passif. Ce point est essentiel et nous aurons l'occasion d'y revenir. Ce que reçoivent les organes sensoriels, c'est la forme de l'objet perçu sans la matière qui le constitue, de la même manière que la cire s'imprime de la forme d'une bague à sceau sans en conserver le métal. Chaque organe sensoriel, cependant, se trouve affecté par une impression spécifique venant des objets qu'Aristote nomme « sensible propre ». Et le sensible propre de la vue, c'est la couleur :

J'appelle sensible propre celui qui ne peut être perçu par un autre sens et qui ne laisse aucune possibilité d'erreur : tels pour la vue la couleur, pour l'ouïe le son, pour le goût la saveur¹⁷⁸.

C'est au moyen de la couleur que les qualités visibles des objets peuvent être perçues. Pour cela, il est nécessaire que le milieu intermédiaire (l'air par exemple) entre l'objet et l'œil soit transparent. La vision s'opère lorsque la couleur de l'objet met le milieu intermédiaire (le diaphane) en mouvement et que ce mouvement est transmis à l'œil :

La couleur met en mouvement le diaphane en acte, l'air par exemple, et celui-ci à son tour met l'organe sensoriel avec lequel il est en contact (...). C'est le milieu qui est ébranlé et celui-ci à son tour ébranle les organes correspondants¹⁷⁹.

Enfin, pour Aristote la lumière n'est ni une substance matérielle, ni un mouvement, mais un état : « La lumière est l'acte du diaphane en tant que diaphane »¹⁸⁰. Le milieu intermédiaire a

¹⁷⁸ Aristote, *De l'âme*, op. cit. livre II, 7, 418a.

¹⁷⁹ Ibid. 419a.

¹⁸⁰ Ibid. 418b.

la capacité d'être transparent (Aristote parle de « diaphane en puissance »), mais ne l'est pas toujours, notamment la nuit ; lorsque le milieu devient effectivement transparent (Aristote le qualifie de « diaphane en acte »), il est lui-même la lumière. Davis Ross résume ainsi la théorie aristotélicienne de la vision :

En ce qui concerne la vue, Aristote fonde sa théorie sur ces faits d'observation : 1° un objet placé sur l'œil n'est pas vu (ce qui montre qu'un milieu est nécessaire), et 2° tandis que le feu peut être vu soit dans la lumière soit dans l'obscurité, les objets colorés non-lumineux ne peuvent être vus que dans la lumière. Il suppose donc que le feu possède un pouvoir que n'ont pas les objets colorés : celui de rendre transparent en acte ce qui est transparent en puissance. La transparence potentielle est un caractère commun à l'air à l'eau et à de nombreux corps solides. L'actualité de la transparence pour de tels corps est la lumière. La lumière n'est donc pas un mouvement mais une actualité ou un état ; et elle résulte d'un changement qualitatif instantané produit dans un milieu potentiellement transparent. Un corps potentiellement coloré agit sur le milieu actuellement transparent, c'est-à-dire y produit un nouveau changement qualitatif, et devenant ainsi coloré en acte produit la vision en acte¹⁸¹.

En présence de lumière, la couleur d'un objet met en mouvement le milieu qui sépare l'objet de l'œil ; ce dernier est alors lui-même agité : « la couleur est continue à la lumière et la lumière l'est à la vue »¹⁸². Aristote ne fournit aucune explication de ce processus, pas plus qu'il ne décrit ce qui se passe à l'intérieur de l'œil. Toutefois, les idées aristotéliciennes de la vision constituent le noyau d'une théorie alternative, celle des péripatéticiens, qui se dessine dans l'Antiquité tardive et qui s'oppose à celle des stoïciens. Cette théorie réussit à concilier les idées d'Aristote avec celles des atomistes et propose un traitement géométrique de la vision selon les préceptes de Ptolémée : la vision est due à un mouvement qualitatif de lumière à partir des objets, mouvement qui convoie les qualités visibles des objets jusqu'à l'œil *via* la couleur ; cette transmission peut, de plus, être soumise à l'analyse géométrique et sera représentée par la théorie médiévale des *species*.

2.2. La controverse du « sens » de la vue, de l'optique antique à l'optique médiévale occidentale.

Entre le 5^e siècle avant J.C. et le 2^e après J.C., la vision fait l'objet d'interprétations diverses et antagonistes. Sans entrer dans la structure profonde des théories qu'ils représentent et que nous venons de détailler, nous pouvons affirmer que les penseurs de l'Antiquité qui

¹⁸¹ Ross D. *Aristote* (1953) trad. J. Samuel, Archives Contemporaines, 2000 p. 195.

¹⁸² Aristote, *Leçons de physique*, op. cit. livre VII, 15.

s'expriment à propos de la vision s'opposent sur le sens de la vue (vers ou depuis l'œil) ouvrant ainsi la voie à la plus longue controverse de l'histoire des sciences.

L'auteur latin Chalcidius jouera un rôle déterminant dans le développement de l'optique occidentale médiévale. Au début du 4^e siècle après J.C. il traduit en latin et commente la première partie du *Timée* dans laquelle Platon expose ses idées sur la vision. Chalcidius se pose alors en fervent défenseur des théories platoniciennes de la vision et propose une discussion des théories alternatives, celles des atomistes, mais également celles des stoïciens et des péripatéticiens¹⁸³. Il participe également à la diffusion des descriptions anatomiques de l'œil réalisées par Galien. Chalcidius parvient ainsi à concilier les descriptions galéniques de l'œil et les théories platoniciennes de la vision. La synthèse opérée par Chalcidius sera reprise par Saint Augustin dont l'autorité influencera dès le 4^e siècle une grande partie de la pensée chrétienne médiévale.

Saint Augustin n'a jamais écrit de traité d'optique. Pourtant, dans le contexte de sa doctrine philosophique, il se prononce en faveur des théories platoniciennes de la vision. En effet, l'extramission est selon lui la seule théorie qui puisse être compatible avec la raison théologique : puisque la vision émane de Dieu par le truchement de l'âme, elle ne peut pas être le résultat de l'entrée dans l'œil d'un influx extérieur à lui.

En premier, la lumière est diffusée à travers les yeux seuls, puis elle jaillit sous forme de rayons des yeux jusqu'à la chose visible observée (...) ¹⁸⁴.

Il serait incorrect, là encore, de considérer que la lumière dont il est question ici est identique à celle émise par des sources telles que les flambeaux. Dans la pensée philosophique de Saint Augustin, la lumière est la présence de Dieu dans l'Homme, celle qui emplit l'âme et permet de juger le monde avec justesse et bonté. Cette lumière de l'âme s'oppose à la lumière du jour susceptible de nous tromper. Dans les *Confessions*, Saint Augustin présente la lumière extérieure comme un tentation à combattre :

O lumière que voyait Tobie, lorsque étant aveugle des yeux du corps, il enseignait à son fils le véritable chemin de la vie, et sans s'égarer jamais, marchait devant lui avec les pieds de

¹⁸³ Pour plus de détails à propos du travail de Chalcidius, voir Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. 88-89.

¹⁸⁴ Saint Augustin, *De genesi ad litteram*, XII, 32 cité par D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. 87-90. Notre traduction.

la charité ! (...). Voilà quelle est la véritable lumière, l'unique lumière ; et tous ceux qui la voient et qui l'aiment, ne sont tous ensemble qu'une même chose. Au contraire cette lumière corporelle dont je parlais, répand dans la vie du siècle une malheureuse douceur, et mille attraits dangereux¹⁸⁵.

Dans la tradition augustinienne, seul Dieu est la Lumière. La lumière extérieure, celle des objets, du Soleil, est une imitation trompeuse. La seule façon pour l'Homme d'accéder à la connaissance Vraie (celle de Dieu) est de se laisser imprégner par Dieu, c'est-à-dire par la Lumière intérieure, et de laisser celle-ci aller au contact des choses du monde. Dans cet esprit, il est donc nécessaire que la vision obéisse à un principe extramissioniste. La tradition médiévale chrétienne sera marquée de l'autorité de Saint Augustin qui imposera la théorie platonicienne du rayon visuel dans la science occidentale jusqu'au 13^e siècle.

Sans doute influencés par la diffusion des travaux des savants arabes réalisés entre les 9^e et 11^e siècles (travaux que nous détaillerons dans la prochaine section), et par les traductions latines des philosophes grecs, les perspectivistes médiévaux du 13^e siècle vont réactiver la controverse du sens de la vue sur les bases d'un argumentaire hérité des traditions grecques et arabes¹⁸⁶. Robert Grosseteste, Roger Bacon et John Pecham sont les protagonistes d'un débat qui va à nouveau opposer deux théories de la vision, l'une prétendant que l'œil émet des rayons, l'autre assurant que les objets visibles émettent quelque chose vers l'œil. Grosseteste pose le débat en ces termes :

Ainsi, les philosophes de la nature, affirmant que la vue naturelle est totalement passive, disent que la vision se fait par intromission. Mais les mathématiciens et les physiciens, affirmant que la vue naturelle est entièrement active, disent qu'elle se fait par extramission¹⁸⁷.

Grosseteste (1168-1235) défend les théories du rayon visuel : « la vraie perspective reste donc sur l'hypothèse des rayons émis »¹⁸⁸, tout en admettant qu'il doit être possible de concilier toutes les théories de la vision en combinant extramission et intromission dans une perspective platonicienne :

¹⁸⁵ Saint Augustin, *Confessions*, trad. A. d'Andilly, Folio Classique, 1993, p. 384.

¹⁸⁶ Les travaux disponibles sont ceux d'Euclide, d'Aristote, d'Averroès, d'Avicenne et de Al-Kindi, puis plus tard, ceux d'Alhazen et de Ptolémée.

¹⁸⁷ Robert Grosseteste, cité par Dominique Raynaud *La sociologie des controverses scientifiques*, op. cit. p. 119.

¹⁸⁸ Ibid.

On doit comprendre que la vision résulte de l'association de rayon visuel avec le rayonnement émis par la surface éclairée de l'objet¹⁸⁹.

Toutefois pour Grosseteste, l'émission reste première et dominante. C'est par une tentative de conciliation identique à celle tentée par Grosseteste que Roger Bacon (1214-1294) explique la vision par une solution hybride emprunte d'intromission et d'émission :

Les *species* des choses du monde ne sont pas faites pour agir immédiatement sur la vue à cause de la noblesse de celle-ci. Par conséquent, ces *species* doivent être stimulées et excitées par les *species* de l'œil, par l'intermédiaire de la pyramide visuelle¹⁹⁰.

Contrairement à Grosseteste, Bacon connaît le traité d'optique d'Alhazen dans lequel la vision est expliquée par l'entrée de la lumière dans l'œil. Et alors même qu'il admet avec Aristote que la sensation, celle de la vue notamment, est le résultat d'une passion, Bacon peine à rompre avec la tradition augustinienne de l'émission. Bacon superpose ainsi deux idées. La première issue de la pensée d'Alhazen est que les corps éclairés envoient leurs *species* vers l'œil pour stimuler la sensibilité visuelle¹⁹¹. La seconde, conforme à la tradition platonicienne, stipule qu'il existe un rayonnement qui part de l'œil comme de tout autre objet substantiel, et qui s'en éloigne sous forme de cône. Par ailleurs, Bacon explique certains phénomènes de réflexion et de réfraction uniquement par l'hypothèse des rayons visuels :

Quand on voit dans l'eau d'un fleuve le bleu du ciel, ce n'est pas une *specie* qui s'y réfléchit comme dans un miroir, mais plutôt les rayons visuels qui rebondissent sur l'eau et vont se perdre au loin en se mêlant à la luminosité de l'air ambiant¹⁹².

Même si l'influence des travaux d'Alhazen demeure très présente dans l'œuvre de Bacon, ce dernier ne fait pas de la lumière le *stimulus* de l'œil. Il substitue à la lumière une entité matérielle, une espèce [*specie*], qui est la seule à émouvoir le sens de la vue. Il faudra attendre quelques années pour que John Pecham (1230-1292) se démarque définitivement de l'influence de Saint Augustin et impose à la science occidentale une théorie de la vision essentiellement intromissioniste. Pour Pecham, tous les objets éclairés renvoient la lumière

¹⁸⁹ Robert Grosseteste, cité par David Lindberg, *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit., p. 100. Notre traduction.

¹⁹⁰ Ibid. p. 115. Notre traduction.

¹⁹¹ La lumière est perçue comme un agent convoyeur d'une partie infinitésimale de l'objet éclairé. Cette petite partie de l'objet est appelée *species* chez les perspectivistes.

¹⁹² Bacon R. *Perspectiva*, pars I, dist. X, chap.2, cité par David Lindberg, *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit., p. 113. Notre traduction.

qu'ils reçoivent. Ainsi donc, si les corps visibles diffusent la lumière, l'émission des rayons visuels est inutile.

Grosseteste, Bacon et Pecham statuent différemment sur le sens de la vue. Le premier adopte la thèse de l'émission, le second imagine une synthèse conciliatrice et le troisième défend la thèse de l'intromission. Ce qui peut sembler surprenant, c'est d'une part que trois hommes pourtant contemporains les uns des autres et de commune obédience franciscaine (et par conséquent soumis à l'autorité de Saint Augustin) expliquent la vision selon des points de vues contradictoires, et d'autre part que la pensée de Pecham parvienne à s'imposer en règlement à la controverse du sens de la vue. Or on constate qu'il existe un certain parallélisme entre la diffusion de l'optique arabe en occident et l'adhésion progressive des perspectivistes à la thèse de l'intromission. Comme le souligne Dominique Raynaud :

Grosseteste refuse cette thèse [celle de l'intromission] en 1240, Bacon l'admet à moitié en 1262, Pecham la défend entièrement en 1279. Or ce progrès coïncide assez bien avec le degré de pénétration du *De aspectibus* d'Ibn al Haytham [Alhazen]. Grosseteste ne le cite jamais, Bacon s'y réfère en plusieurs parties, Pecham le connaît par les travaux de Bacon et de Vitellion. A mesure que les docteurs ont eu la possibilité d'étudier et de discuter ses travaux, leur position s'est assimilée à celle du savant arabe¹⁹³.

En fait, l'analyse de Raynaud nous montre que le succès du règlement proposé par Pecham est le fait d'un choix rationnel qu'aucun contexte politico-religieux ne peut expliquer :

A l'inverse de ce que prédit une reconstruction sociologique inspirée par les principes du relativisme, les positions intromissionnistes ont été acquises par un examen rationnel du problème, contre l'influence de facteurs extrascientifiques (...) Car l'optique médiévale présente cette particularité d'être à la fois un lieu de controverse où les connaissances auraient dû être socialement déterminées par des facteurs théologiques, mais ne l'ont pas été. Les opticiens ont préféré la logique et l'expérience aux arguments d'autorité¹⁹⁴.

Il semble donc que le caractère rationnel de la théorie défendue par Alhazen soit à même de faire valoir ses conclusions contre celles de Saint Augustin. En adoptant un point de vue exclusivement intromissionniste et en posant la lumière comme *stimulus* de la vue, Alhazen parvient à expliquer les phénomènes optiques avec davantage de cohérence et de rationalité que ne le font les représentants du courant extramissionniste. C'est donc par la supériorité de sa

¹⁹³ Raynaud D. *La sociologie des controverses scientifiques*, op. cit. p. 127.

¹⁹⁴ Ibid. p. 133.

logique que la théorie défendue par Alhazen parvient à s'imposer dans l'optique médiévale occidentale¹⁹⁵.

2.3. Alhazen et les théories de la vision

Cette section a pour objet d'analyser la démarche optique d'Alhazen. En particulier nous montrerons que le savant cairote a su tirer profit de l'héritage grec pour élaborer une théorie de la vision dans laquelle la lumière devient le médiateur de la vue. Dans un premier temps nous tenterons de dégager les éléments qui permettent à Alhazen d'adopter une posture intromissionniste, puis dans un second temps, nous verrons comment il parvient à poser la lumière comme *stimulus* de la vue.

2.3.1. Alhazen, héritier de l'optique hellène

Les premiers savants arabes qui s'intéressent à l'optique se mettent à l'école des auteurs grecs :

L'optique arabe est héritière de l'optique hellène, et, pourrait-on même dire, d'elle seule. Elle lui a emprunté ses questions, ses concepts, ses résultats, et même les différentes traditions entre lesquelles elle s'est partagée à l'époque alexandrine¹⁹⁶.

Cet héritage est constitué en particulier de la traduction de l'*Optique* d'Euclide et de la majeure partie de l'*Optique* attribuée à Ptolémée, mais également de certains écrits d'Héron d'Alexandrie, de la traduction arabe des *Météorologiques* et du traité *De l'âme* d'Aristote ainsi que des travaux de Galien sur l'anatomie de l'œil. Pourtant, l'influence de l'optique hellène dans la science arabe médiévale n'empêche pas l'émergence d'une recherche novatrice dans laquelle les savants arabes rectifient ou amendent les écrits de leurs prédécesseurs. Si dans ces premiers temps (et à la suite de Galien), l'optique arabe demeure

¹⁹⁵ Certains arguments extramissionnistes peuvent être récupérés dans le cadre intromissionniste, alors que le contraire est impossible. En outre, il semble que les arguments de l'extramission se prêtent plus facilement à la critique. D'ailleurs, l'intromission s'attache davantage à contester les arguments extramissionnistes en montrant que certains phénomènes sont impossibles à expliquer dans un contexte extramissionniste. C'est le cas notamment de l'éblouissement. Enfin certains arguments extramissionnistes reposent sur des transpositions de situations discutables. Ainsi en est-il de la vision nocturne des félins. Pour plus détails sur ce point, voir Dominique Raynaud, op. cit. 111-137.

¹⁹⁶ Rashed R. L'optique géométrique, *Histoire des sciences arabes*, op. cit. p. 200.

conforme à la tradition ptoléméenne¹⁹⁷, elle s'en affranchit de façon radicale dès le 11^e siècle grâce aux travaux réformateurs d'Alhazen. A la suite d'Aristote, Alhazen rejette de façon radicale les théories extramissionnistes du « rayon visuel » ; mais il va également s'affranchir des idées des atomistes tout en conservant l'idée de réception par l'œil d'un *quid* venant de l'objet. Il semble qu'Alhazen ait trouvé la source de son inspiration chez les tenants de la tradition aristotélécienne tels qu'Alexandre d'Aphrodise (3^e siècle après J.C.), al-Razi ou Avicenne (10^e siècle)¹⁹⁸, ces « philosophes de la nature » ou « physiciens » qu'il cite à de nombreuses reprises comme le souligne A.I. Sabra :

Pour résoudre le problème de la nature de la lumière, Alhazen avait facilement adopté le point de vue des physiciens et des philosophes de la nature. Cependant, si leur description n'était pas en soi suffisante, elle constituait néanmoins un élément de vérité qu'il fallait combiner avec d'autres éléments décrits par les mathématiciens tels qu'Euclide et Ptolémée. Dans la synthèse qui en a résulté, l'approche mathématique domine la construction de la théorie d'Alhazen ; mais elle diffère du modèle proposé par les mathématiciens dénaturé par l'approche des philosophes de la nature. Au regard des termes employés par Alhazen, il est clair que ces philosophes se réclament de la tradition aristotélécienne : les doctrines qu'Alhazen expose sont directement inspirées des travaux des péripatéticiens tels qu'Alexandre ou Avicenne¹⁹⁹.

Notre analyse s'appuiera essentiellement sur les trois premiers livres du *Kitab al manazir* d'Alhazen disponibles dans une traduction anglaise proposée par A.I. Sabra²⁰⁰.

Comme nous l'indiquions précédemment, Alhazen va donc prendre part aux débats qui opposent extramissionnistes et intromissionnistes :

Les philosophes de la nature défendent l'idée selon laquelle la vision est affectée par une forme qui venant de l'objet affecte l'œil et grâce à laquelle la vue perçoit la forme de l'objet. Les mathématiciens pour leur part (...) s'accordent pour dire que la vision se produit par l'émission d'un rayon qui sortant de l'œil va vers l'objet visible²⁰¹.

¹⁹⁷ C'est le cas notamment d'Ibn Luqa, d'Al Kindi et d'Ibn Sahl.

¹⁹⁸ Pour Avicenne, la vision n'est pas due à l'émission de rayons qui, partant de l'œil rencontrent l'objet à regarder, mais à l'émanation de la forme de l'objet qui est transmise par le milieu intermédiaire jusqu'à l'œil.

¹⁹⁹ A.I. Sabra, Form in Ibn al Haytham theory of vision, *Optics, astronomy and logic, studies in Arabic science and philosophy*, 1984, p. 191.

²⁰⁰ Alhazen, *Kitab al manazir*, trad. A.I. Sabra sous le titre *The optics*, University of London, 1989. Les extraits que nous utiliserons seront chaque fois traduits par nous-même.

²⁰¹ Alhazen, *Kitab al manazir*, livre 1, chap. 1. Alhazen conserve le terme de « forme » tel qu'il était utilisé dans la tradition aristotélécienne, c'est-à-dire une entité non-matérielle, à la différence de l'usage qu'en font les atomistes de l'Antiquité.

Il inscrit sa réflexion au cœur de la controverse du sens de la vue en analysant avec soin chacune des idées en jeu dans le débat, et se positionne clairement en faveur des théories de l'intromission :

Nous disons que l'œil a la sensation de la lumière et de la couleur qui sont à la surface des objets visibles grâce aux formes qui atteignent l'œil à sa surface²⁰².

L'unité de fonctionnement sensoriel défendue par Aristote dans son traité *De l'âme*, semble avoir joué un rôle déterminant dans la posture adoptée par Alhazen. Rappelons que d'après Aristote, les sens fonctionnent selon un principe unificateur, celui de la passion :

La sensation consiste à être mû et à pâtir (...). C'est moyennant une passion subie par l'organe que se produit la sensation²⁰³.

Ainsi, la sensation est-elle « l'acte commun du sensible et du sentant ». Par sensible, il faut entendre tout ce qui provient des objets et qui provoque la sensation ; par sentant, les organes des cinq sens lorsqu'ils sont le lieu de la sensation. Appliqué à la vision, ce schème sensitif fait de la vision une passion dans laquelle le sentant est l'œil et le sensible la couleur. Rappelons les propos d'Aristote que nous avons cités plus haut :

Du moins est-il évident pour le moment que ce que l'on voit dans la lumière, c'est la couleur (...). La couleur met en mouvement le diaphane, l'air par exemple, et celui-ci à son tour meut l'organe sensoriel avec lequel il est en contact²⁰⁴.

Aristote considère donc la vision à l'image de tous les autres sens, c'est-à-dire comme le résultat d'une passion.

Un autre élément jouera un rôle capital dans l'évolution rationnelle des théories de la vision : l'apport des connaissances biologiques de l'œil qui est considérable dans l'œuvre réformatrice d'Alhazen. Grâce à la dissémination des travaux de Galien, l'anatomie de l'œil devient partie intégrante des discussions sur la vision, non seulement parmi les médecins, mais également parmi ceux qui rejettent l'idée d'une quelconque émission depuis l'œil. Ainsi, l'étude

²⁰² Alhazen, *Kitab al manazir*, livre 1, chap. 6. La signification du terme « forme » utilisé à nouveau par Alhazen semble ambiguë. Pourtant, les historiens s'accordent aujourd'hui pour dire que ce terme désigne sans ambiguïté la lumière dans l'expression « forme de la lumière » et la couleur dans l'expression « forme de la couleur ». Il s'agit pour Alhazen de ne pas trop se démarquer de la tradition aristotélicienne. Voir à ce sujet, A.I. Sabra, Form in Ibn al-Hathaym's theory of vision, in. *Optics, astronomy and logic, studies in arabic science and philosophy*, op. cit. 115-140.

²⁰³ Aristote, *De l'âme*, op. cit. livre II, 5, 417a-419a.

²⁰⁴ Ibid.

anatomique de l'œil constitue-t-elle une partie importante de la critique des théories du flux visuel en faveur de l'intromission et des théories aristotéliennes. Le fait que l'intérieur de l'œil soit transparent explique notamment que la couleur des objets et la lumière puissent agir sur lui comme elles agissent sur le milieu intermédiaire situé entre l'œil et les objets. Cette idée est directement inspirée de la pensée d'Aristote :

Que l'intermédiaire entre ce qui est vu et l'œil soit de la lumière ou de l'air, c'est le mouvement qui le traverse qui produit la vision et il est logique que l'intérieur de l'œil soit constitué d'eau. L'eau en effet est diaphane : or, de même qu'on ne pourrait voir s'il n'y avait pas de lumière à l'extérieur de l'œil, de même aussi doit-il y avoir de la lumière à l'intérieur. Il faut donc qu'il y ait du diaphane et il est nécessaire que ce soit l'eau puisque ce n'est pas l'air. (...) C'est pourquoi il est nécessaire que l'intérieur de l'œil soit diaphane et capable, ainsi, de recevoir la lumière²⁰⁵.

Al-Razi reprend à son compte l'explication proposée par Aristote et y adjoint de façon ingénieuse le rôle joué par la pupille. Il considère ainsi le mouvement de la pupille comme un mécanisme régulant la quantité de lumière qui pénètre l'œil :

la pupille se contracte ou se dilate selon la quantité de lumière externe nécessaire à l'humeur cristalline²⁰⁶.

Alhazen consacre un chapitre entier du *Kitab* à la description anatomique de l'œil qu'il illustre de dessins d'une remarquable précision comme en atteste la figure ci-dessous (Figure 23).

²⁰⁵ Aristote, *De la Sensation et des sensibles*, op. cit. 438b.

²⁰⁶ Al-Razi cité par Lindberg D. *Theories of vision from al-Kindi to Kepler*, op. cit; p. 42.

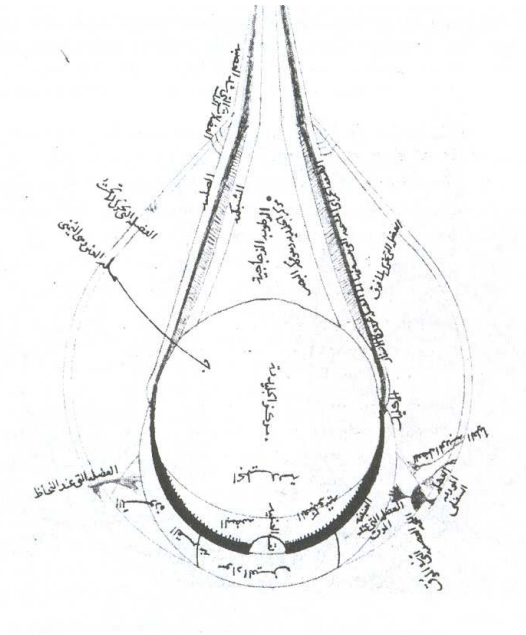


Figure 23 : Alhazen, dessin anatomique de l'œil²⁰⁷.

En résumé, c'est à partir de quelques principes hérités notamment de la science de l'Antiquité et des travaux anatomiques de Galien qu'Alhazen va proposer une explication révolutionnaire du mécanisme optique de la vision. Celle-ci ouvrira la voie à l'élaboration des théories actuelles. Ces principes sont les suivants : la vue, comme tous les autres sens, est le résultat d'une passion ; l'œil, parce qu'il est transparent, laisse pénétrer la lumière ; enfin, la pupille de l'œil est un régulateur d'intensité lumineuse.

2.3.2. La lumière comme *stimulus* de la vue : Alhazen et le règlement rationnel de la controverse du sens de la vue.

Alhazen ne va pas se contenter de reprendre à son compte les idées de ces prédécesseurs. Dans le *Kitab*, il va s'attacher à construire une théorie qui, certes, en sera inspirée, mais dont les principes sont élaborés à partir d'expériences avant d'être soumis à la conceptualisation. La démarche d'Alhazen est révolutionnaire puisqu'elle substitue à l'expérience par la pensée une méthode expérimentale minutieusement décrite (matériel nécessaire, protocole,

²⁰⁷ Alhazen, *Kitab al Manazir*, livre 1, chap.4.

observations...)²⁰⁸. Chaque avancée théorique est présentée comme induite par les observations exposées. Alhazen introduit chacune de ses conclusions par une expression de type : « D'après ce que nous avons découvert par l'expérience et par induction, il est évident que... ». De même, la plupart des propositions faites avant lui sont ainsi passées au crible de l'expérience. Toutefois, les conclusions présentées par Alhazen ne peuvent pas systématiquement être construites à partir des expériences qu'il propose. Comme nous l'évoquions précédemment, le principe selon lequel la vision est le résultat de l'entrée de la lumière provenant de cet objet dans l'œil nécessite un saut conceptuel que nulle expérience ne peut susciter toute seule. La partie suivante se propose d'analyser comment Alhazen est parvenu à élaborer ce principe, principe que nous appellerons désormais « doctrine d'Alhazen ».

Analyse de la construction de la doctrine d'Alhazen

Reprenons pas à pas le cheminement d'Alhazen. Dans un premier temps, Alhazen expose les conditions qui permettent à la vue de s'exercer. Ainsi, un objet peut être vu directement s'il existe un espace ininterrompu et non opaque entre l'œil et l'objet ; si l'on peut conduire des lignes droites imaginaires depuis cet objet vers l'œil, et enfin, si de la lumière est présente à la surface de cet objet. Dans ce dernier cas, la lumière qui est sur l'objet (lumière accidentelle²⁰⁹) envoie dans toutes les directions une lumière secondaire accompagnée de la couleur de l'objet, ce qu'Alhazen déduit de l'expérience suivante :

Si un objet de couleur intense et brillante est placé à la lumière du Soleil près d'un autre objet parfaitement blanc placé, lui, dans une zone ombragée, alors, la couleur du premier objet apparaîtra à la surface du second objet²¹⁰.

La lumière accidentelle est créée par la lumière qui atteint l'objet depuis une source lumineuse (lumière primaire) ou depuis un autre objet éclairé²¹¹. Un objet opaque se comporte

²⁰⁸ Dans le *Kitab*, Alhazen utilise une chambre noire comme lieu d'expérimentation sur la lumière : une petite ouverture par laquelle pénètre un petit filet de lumière est pratiquée dans la paroi d'une pièce entièrement close. C'est avec ce dispositif qu'Alhazen démontre la propagation rectiligne de la lumière ou encore la diffusion de lumière par des écrans colorés. Voir *Kitab*, livre 1, chap.1.

²⁰⁹ Dans le langage d'aujourd'hui, l'expression « lumière accidentelle » correspond à « l'impact lumineux ».

²¹⁰ Alhazen, *Kitab*, livre 1, chap.2.

²¹¹ Alhazen, *Kitab*, livre 1, chap.3.

donc comme une source lumineuse. On pourrait proposer une première approche schématique de la pensée d'Alhazen (Figure 24) :

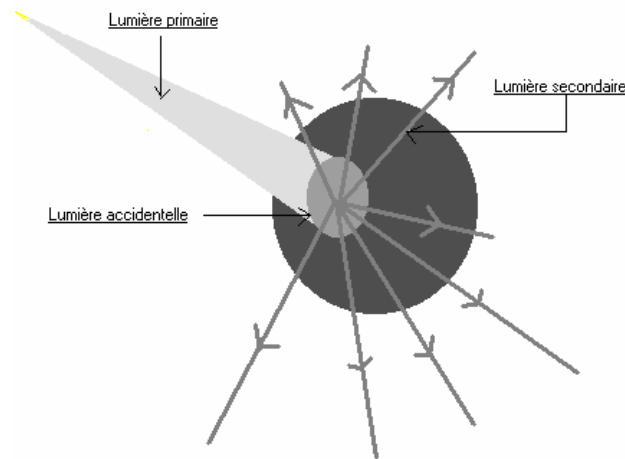


Figure 24 : Schéma représentant le phénomène de diffusion selon Alhazen

Le phénomène de la diffusion vient d'être interprété pour la première fois. Pour Alhazen, la lumière d'une source lumineuse apparaît sur les corps opaques éclairés (c'est la lumière accidentelle), elle s'y fixe et donne naissance à une lumière secondaire :

Appelons lumière secondaire la lumière qui émane de la lumière accidentelle par réflexion, c'est-à-dire comme le fait la lumière qui se réfléchit depuis les surfaces lisses. Cette lumière émane des objets de la même façon que la lumière primaire ou essentielle émane des corps lumineux par eux-mêmes²¹².

Il existe donc une identité de comportement entre les lumières envoyées par n'importe quel corps lumineux (lumières primaires) et celles que diffuse (renvoie) n'importe quel corps opaque non poli (lumières secondaires).

Ensuite, Alhazen propose toute une série d'expériences qui tendent à prouver que la lumière et les couleurs affectent la vue et provoquent certains effets sur l'œil²¹³ : l'œil est blessé lorsqu'il fixe une lumière très intense, l'œil conserve pendant un certain temps la forme et la couleur d'un objet fortement éclairé, la vue est perturbée si la lumière de l'objet est trop forte

²¹² Ibid. p. 37-38.

²¹³ Voir chapitre 4 du Kitab.

ou trop faible ou si une lumière intense éclaire les yeux ou le milieu intermédiaire situé entre l'œil et l'objet, etc. Et il termine par ces mots :

La forme que la vue perçoit d'un objet dépend de la lumière sur l'objet, et des lumières qui éclairent l'œil au moment de la perception et qui éclairent l'air entre l'œil et l'objet visible²¹⁴.

Il faut attendre le sixième chapitre du livre 1 du *Kitab*, pour qu'Alhazen propose une synthèse de ces déductions et conclue que voir c'est avoir la sensation de la couleur et de la lumière qui se trouve à la surface de chaque objet. Cette sensation est provoquée par l'arrivée dans l'œil de la couleur de l'objet, accompagnée par la lumière :

La sensation que l'œil a de la couleur et de la lumière d'un objet est produite grâce à la forme qui est un mélange de lumière et de couleur, et qui arrive dans l'œil depuis la surface de l'objet²¹⁵.

Le raisonnement qui conduit à cette conclusion peut être résumé comme suit : les objets éclairés émettent, dans toutes les directions, de la lumière à partir de l'impact lumineux à leur surface. Lorsque l'œil se trouve face à un objet éclairé, il est situé sur le trajet de la lumière qui part de l'objet. Et comme la propriété de la lumière est d'affecter la vue et que le propre de l'œil est d'être sensible à la lumière alors, la vue s'exerce grâce à la lumière qui, partant de l'objet, atteint l'œil.

Alhazen et le traitement quantitatif de la vision

En fait, et aussi paradoxal que cela puisse paraître, le problème de l'éblouissement semble être au fondement des théories de la vision développées par Alhazen. Pour lui, si la lumière blesse l'œil et perturbe la vue c'est qu'elle a un effet particulier sur l'œil et sur la vue :

Nous avons remarqué que lorsque l'œil fixe une lumière intense, celui-ci est blessé. De même, lorsqu'un observateur se tourne vers le Soleil, il lui est impossible de le regarder fixement car son œil est blessé par la lumière provenant du Soleil (...). Tout cela montre que la lumière a un effet sur l'œil²¹⁶.

²¹⁴ Alhazen, *Kitab*, livre 1, chap. 6.

²¹⁵ Ibid.

²¹⁶ Ibid.

Et pour en déduire que la lumière est le *stimulus* de la vue, il raisonne non plus sur la lumière en tant qu'objet conceptuel, mais sur la quantité de lumière que les objets (lumineux par eux-mêmes ou par diffusion) envoient vers l'œil²¹⁷ :

Les effets de la lumière sur l'œil sont de même nature que ceux de la douleur. Mais de même que certaines douleurs sont insupportables, d'autres, au contraire, lorsqu'elles sont plus faibles, ne gênent en rien l'organe qui les supporte. De telles douleurs ne sont alors pas perceptibles. Le fait qu'une lumière intense blesse les yeux est la preuve que lumière et douleur sont de même nature. Par conséquent, quels que soient ses effets, perceptibles ou non, ceux provoqués par la lumière sur l'œil sont tous de même nature et ce qui change ce n'est que le plus ou moins. Une lumière faible et modérée n'est pas ressentie comme de la douleur, tandis qu'une forte lumière provoque de la douleur. **La seule chose qui change, c'est le plus ou le moins**²¹⁸.

Autrement dit, l'œil a la sensation de l'éclairement, et cette sensation est commandée par la quantité de lumière qui pénètre l'œil ; **l'œil voit l'objet lorsque la quantité de lumière provenant de cet objet n'est ni trop forte, ni trop faible**. C'est donc par un traitement quantitatif qu'Alhazen parvient à poser la lumière comme *stimulus* de la vue²¹⁹.

Lorsque l'historien des sciences Roshdi Rashed analyse l'optique arabe, celle d'Alhazen en particulier, il parle de « véritable révolution » et de « profonde rupture » :

Deux siècles ont suffi pour préparer ce qui fut finalement une vraie révolution, qui marqua à jamais l'histoire de l'optique, voire plus généralement celle de la physique. C'est ce

²¹⁷ Dire qu'Alhazen raisonne en termes de « quantité de lumière » relève d'un anachronisme certain dont nous sommes parfaitement consciente. En effet, le terme « quantité » n'apparaît en réalité qu'au 12^e siècle, époque à laquelle il renvoie à la question « combien grand est... ? » (voir *Dictionnaire historique de la langue française*, d'Alain Rey). Et ce n'est qu'à partir du 17^e siècle que la physique (celle de Descartes en particulier) propose de raisonner en termes de « quantité de... ». A titre d'exemple, l'expression « quantité de lumière », se trouve clairement exprimée par Descartes au discours sixième de la *Dioptrique*. Si nous posons que le terme « quantité » renvoie à l'idée de « plus ou moins » ou de « trop ou pas assez », alors nous admettrons que lorsque Alhazen parle de « plus ou moins de lumière », il évoque l'idée implicite d'une certaine « quantité de lumière ». Cette analyse rétrospective est certes illusoire puisqu'elle surimpose aux idées du passé un terme alors inexistant, mais sa portée didactique est telle que nous en conserverons le résultat, à savoir l'assimilation d'un raisonnement en « plus ou moins de » ou « trop ou pas assez de » ou « suffisamment de » à un raisonnement en « quantité de ».

²¹⁸ Alhazen, Kitab, livre 1, chap. 6. C'est nous qui soulignons.

²¹⁹ Nous avons trouvé une idée assez proche de celle développée par Alhazen dans les écrits du savant égyptien Jean Philopon. Au 6^e après J.C., Philopon reprend les théories aristotéliennes de la lumière selon lesquelles « la lumière est le diaphane en acte », mais il ajoute que la lumière produit certains effets sensibles. En particulier, Philopon remarque que la lumière concentrée par un miroir concave produit de la chaleur. Par ailleurs, Philopon cherche à comprendre pourquoi les objets éloignés nous apparaissent moins distinctement que lorsqu'ils sont proches. En réponse à cette question, il introduit l'idée que des objets émane de l'*energeia*, sorte d'entité immatérielle inscrite dans la lumière et les couleurs, et qui transporte les images des objets. Ainsi, si les objets éloignés nous semblent plus petits, c'est que l'*energeia* qu'ils émettent est plus faible que lorsqu'ils sont proches. Nous ne proposerons pas de traduction de cette *energeia*. Ce qui nous intéresse ici, c'est que cette entité peut être traitée en termes de « plus ou moins », c'est-à-dire de façon quantitative. Voir D. Park, *The fire within the eye*, op. cit. p. 71.

mouvement dialectique entre une solide continuité et une profonde rupture qu'il nous appartient de décrire pour saisir la marche de l'optique arabe²²⁰.

Nous pensons pouvoir affirmer que malgré un argumentaire très expérimental, certains principes énoncés par Alhazen relèvent d'une géniale intuition et non d'une déduction empiriste. Ainsi en est-il de la doctrine selon laquelle la lumière est le *stimulus* de la vue. Nous l'avons déjà évoqué, cette doctrine n'est pas une évidence de sens commun. Dire que la lumière entre dans l'œil même lorsque l'on n'est pas ébloui et que c'est grâce à cela que l'on voit nécessite la réalisation d'un saut conceptuel dont Alhazen est à l'origine. L'agent médiateur de la vue, celui qui fait le lien entre l'œil et l'objet, est identifié à un corps invisible qui, dans le cas de la vision ordinaire, ne provoque pas d'effet sensible. Tout le génie d'Alhazen réside selon nous dans le fait d'avoir su créer un objet conceptuel (la lumière) qui se prête au jeu du traitement quantitatif, un objet sur lequel il est possible de parler en termes de « plus ou moins ». Si l'on s'en tient à une explication quantitative de la vision, la proposition d'Alhazen demeure suffisante et conforme aux exigences scientifiques actuelles. Nous verrons d'ailleurs que si Kepler et Descartes contestent le traitement géométrique et physiologique de la vision proposé par Alhazen, ils conservent en l'état l'idée qu'une quantité déterminée de lumière entrant dans l'œil permet de voir.

Alhazen et le traitement géométrique de la vision

Considérer la lumière comme agent médiateur de la vue permet toutes les audaces conceptuelles qu'Alhazen et ses successeurs ne manquent pas d'oser. Le concept de « rayon » constitue sans doute la première de ces audaces. Dans son *Discours de la lumière*, Alhazen précise le sens qu'il entend en donner :

Les lignes droites suivant lesquelles la lumière se propage sont des lignes virtuelles et non réelles. Les lignes virtuelles et la lumière qui se propage suivant ces lignes forment ensemble ce que l'on appelle rayon²²¹.

Affirmer que la vision se fait par l'intermédiaire d'un agent extérieur (la lumière) venant de l'objet vers l'œil, signifie que l'on considère l'objet comme une source lumineuse (qu'il soit lui-même lumineux ou éclairé par une autre source). A partir d'un point, cette lumière se

²²⁰ Rashed R. L'optique géométrique, *Histoire des sciences arabes*, op. cit. 293-318.

²²¹ Alhazen, Le discours de la lumière, trad. R. Rashed in. *Revue d'histoire des sciences*, 1968, 195-224.

propage de façon rectiligne, dans toutes les directions²²². Il en est donc de même pour la lumière secondaire, issue des objets opaques éclairés.

Alhazen oriente son raisonnement vers une analyse infinitésimale, c'est sa deuxième audace conceptuelle : un objet éclairé est décomposé en éléments punctiformes, c'est-à-dire en un ensemble de points sans dimension. Chaque point de l'objet éclairé envoie un ensemble de rayons qui constituent un faisceau.

Après ces remarquables avancées conceptuelles, il peut proposer un modèle géométrique pour la vision tout à fait prometteur. La lumière, quand elle se heurte à l'obstacle d'un corps opaque, donne naissance à une lumière secondaire, qui extrait de chacun des points de l'objet des formes lumineuses et colorées. Celles-ci sont transportées *via* le trajet des rayons jusqu'à l'œil et s'impriment en bon ordre dans le cristallin :

Nous disons donc que lorsque l'œil fixe un objet visible, alors la surface de l'œil reçoit de la part de chaque point de cet objet la forme de la couleur et la forme de la lumière qui se trouvent en chacun de ces points (...). Et si à un point de la surface de l'œil correspond un point de la surface de l'objet alors chaque partie de l'objet sera ordonnée dans l'œil et ainsi, l'objet sera vu distinctement²²³.

La surface d'un objet est considérée par Alhazen comme un agrégat de points dont chacun possède les propriétés (colorées et lumineuses) d'une toute petite partie de la surface de l'objet. En outre, à chacun des points de l'objet correspondra un point dans l'œil de l'observateur, isomorphe du précédent, par l'intermédiaire d'un rayon unique. Enfin, la partie proprement sensorielle de l'œil est le cristallin et non la rétine, dont le rôle ne sera établi par Kepler que six siècles plus tard :

L'œil peut percevoir l'objet visible uniquement si à chacun des points de l'objet correspond un point à la surface du cristallin²²⁴.

Pour Alhazen, la vision résulte d'une correspondance point par point : à chaque point de l'objet visible correspond un point dans le cristallin. Or pour obtenir cette correspondance point par point, Alhazen ne conserve qu'un unique rayon parmi tous ceux qui constituent le faisceau de rayons issu de chacun des points de l'objet. La discrimination opérée par Alhazen

²²² Alhazen, *Kitab*, livre 1, chap. 1.

²²³ Ibid. chap. 6.

²²⁴ Ibid.

à la surface du cristallin entre les rayons n'est pas de nature physique, en ce sens qu'elle ne résulte pas des lois de propagation de la lumière, qu'Alhazen connaît pourtant fort bien. Il l'attribue à une propriété sensorielle spécifique du cristallin, qui est de n'être sensible qu'aux rayons qui le frappent à la perpendiculaire et qui reçoit dans sa profondeur les formes lumineuses et colorées que ceux-ci véhiculent :

La vision ne se produit que lorsque qu'une forme atteint l'œil. Mais pour qu'il en soit ainsi, parmi tous les points qui atteignent la surface de l'œil à partir d'un point à la surface de l'objet, un seul doit être distingué. De même, parmi toutes les lignes issues d'un unique point de l'objet qui frappent la surface de l'œil, une seule doit être distinguée. Et c'est le long de cette ligne uniquement que la forme d'un point de l'objet pénétrera dans le cristallin (...). Cette ligne est celle qui frappe la surface de l'œil perpendiculairement²²⁵.

C'est ici que le traitement géométrique de la vision devient insuffisant²²⁶. Il est certain que lorsque l'on se limite aux rayons perpendiculaires, on obtient une correspondance parfaite entre les points d'un objet visible et ceux d'un hypothétique écran sensible situé à l'intérieur de l'œil. Une telle approche empêche toute compréhension de l'accommodation, et ne permet pas de résoudre le problème de la localisation de l'objet à regarder. Si un point se situe sur un rayon issu d'un point objet, il n'est pas possible d'évaluer la distance qui sépare l'œil de l'objet vu.

Il nous semble néanmoins important de distinguer l'approche géométrique de l'approche quantitative proposée par Alhazen. Certes, le traitement géométrique de la vision proposé par Alhazen demeure insuffisant : parmi tous les rayons qui pénètrent par la pupille dans l'œil, seul est senti celui qui frappe à la perpendiculaire la face antérieure du cristallin ; et c'est lui qui fait voir le point dont il émane (c'est en fait le seul qui ne soit pas dévié par réfraction en entrant dans l'œil). Mais son approche quantitative lui permet de poser la lumière comme *stimulus* de la vue, ce qui du point de vue de notre physique demeure toujours d'actualité. En outre, à partir du moment où Alhazen pose comme principe qu'il existe une entité extérieure se propageant le long de trajectoires rectilignes capable d'impressionner l'œil, alors cette entité devient un objet d'étude dont la nature devra être identifiée par la physique. La

²²⁵ Alhazen, *Kitab*, livre 1, chap.6. En fait, les formes lumineuses et colorées sont prises en charge par le sens visuel du cristallin qui s'en imprègne. Puis ces formes, passant par les nerfs optiques, se transmettent dans un ordre inchangé jusqu'au cerveau où réside le sens commun (la faculté sensitive ultime, celle qui rassemble les sensations provenant de la vue et de tous les autres sens).

²²⁶ Alhazen (et Vitellion après lui) accorde au rayon perpendiculaire une « force » supérieure à celle du rayon oblique. Cette « force » lui permet de pénétrer l'œil.

découverte d'Alhazen ouvre la voie à une nouvelle optique, une optique physique, science de la lumière.

Les éléments rationnels construits par Alhazen que nous conserverons par la suite peuvent être résumés en ces termes : les objets éclairés envoient de la lumière dans toutes les directions. L'agent de la perception n'est plus un rayon visuel allant au contact de l'objet, mais la lumière issue de la surface diffusante des objets éclairés. Dès lors que l'œil se trouve placé devant cette surface, il peut recevoir de la part de celle-ci une fraction de la lumière qu'elle renvoie, et la voir. Selon Alhazen, la lumière renvoyée par la surface colorée de l'objet entre donc dans l'œil, et parvient jusqu'au cristallin qui est l'organe sensoriel. Pour la première fois dans l'histoire de l'optique la vision est expliquée par la formation d'une image à l'intérieur de l'œil selon un principe stigmatique.

Les transformations opérées par Alhazen sont capitales. Elles sont l'amorce d'un processus d'abstraction fondamental et relèvent de ce que nous pouvons considérer comme une rupture épistémologique avec les théories phénoménologiques antiques. L'optique se dote d'un outil conceptuel, la lumière, qui peut être soumis à l'interprétation quantitative. La théorie physique de la vision entame sa mutation rationaliste.

Nous avons vu précédemment que les théories d'Alhazen sont diffusées en Europe dès le 12^e siècle grâce notamment aux travaux de Roger Bacon et de John Pecham. Ce dernier se positionne d'ailleurs clairement en faveur du savant arabe et son traité d'optique le *Perspectiva communis*, est en réalité une synthèse du *Kitab*. A la suite de Pecham dont il connaît les travaux, Léonard de Vinci (1452-1519) va proposer un modèle explicatif de la vision en s'attachant plus particulièrement aux rôles joués par les différents éléments constitutifs de l'œil. Son modèle est très proche des découvertes d'Alhazen, comme nous allons le voir maintenant.

2.4. Léonard de Vinci et le mécanisme de la vision

Dans ses toutes premières notes sur la vision, Léonard de Vinci défend la théorie de l'émission. Pourtant, à partir de 1492, il s'engage dans la voie ouverte par les perspectivistes du 13^e siècle et se prononce clairement en faveur des théories intromissionnistes. C'est par une étude approfondie de l'anatomie de l'œil qu'il va confirmer l'idée d'Alhazen selon laquelle la

lumière est le *stimulus* de la vue : « Je dis que la vue s'effectue par la médiation de la lumière »²²⁷. Pour lui, le mécanisme de la vision n'est accessible que par une analyse minutieuse des différentes parties qui composent l'œil :

Quelle confiance faire aux anciens qui ont méconnu tant de choses connaissables par l'expérience ! L'œil, qui offre la preuve si évidente de ces fonctions, a été défini par d'innombrables écrivains d'une certaine façon. Mais l'expérience me montre qu'il fonctionne de façon différente²²⁸.

Il semble que la description anatomique proposée par Vinci soit moins performante que celles de ces prédécesseurs, celle de Galien notamment²²⁹. Toutefois, on retiendra que la contribution essentielle de Vinci réside dans le fait d'avoir su interpréter de façon pertinente le rôle de la pupille. C'est sur ce point que nous allons nous attarder maintenant. En effet, Vinci est sans doute le premier à avoir fait un lien rationnel entre la variation de l'intensité de la lumière qui pénètre dans l'œil et la variation du diamètre de la pupille. Certes, nous en avons déjà parlé, ce lien est présent dans l'optique arabe médiévale et en particulier dans les travaux d'Al-Razi. Mais la lumière qui affecte l'œil dans les écrits du savant arabe ne provient pas nécessairement des objets visibles. Elle est davantage assimilée à la clarté ambiante. La contribution de Vinci est donc essentielle puisqu'elle vient conforter la doctrine d'Alhazen par un argument lié au fonctionnement intrinsèque de l'œil. Vinci explique les mouvements de la pupille par un raisonnement quantitatif qui n'est pas sans rappeler celui d'Alhazen :

La pupille de l'œil se change en différentes grandeurs selon la variation de la clarté et de l'obscurité des objets qui se présentent devant elle. En ce cas, la nature est venue au secours de la vertu visuelle quand elle est offensée par l'excès de lumière en faisant restreindre la pupille de l'œil et lorsqu'elle est blessée par l'excès de l'obscurité, elle fait s'élargir circulairement la pupille. La nature fait ici une constante équation en diminuant ou augmentant, grâce à la diminution ou à l'augmentation de la pupille selon la clarté ou l'obscurité des objets²³⁰.

On retrouve dans cette phrase de Vinci un vocabulaire proche de celui utilisé par Alhazen qui compare les effets de la lumière à ceux de la douleur : « Le fait qu'une lumière intense blesse

²²⁷ Léonard de Vinci, cité par Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. p. 161. En fait, le modèle proposé par Vinci est proche de celui des *species* défendu par les perspectivistes ou celui des « formes » d'Alhazen.

²²⁸ Léonard de Vinci, Codex Atlantico, folio 361 verso. Sauf mention contraire, toutes les citations de Léonard de Vinci sont extraites de travaux réalisés par le Syndicat National des Ophtalmologistes de France disponibles sur le site internet <http://www.snof.org/vinci>.

²²⁹ Voir à ce sujet, Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. 162-163.

²³⁰ Léonard de Vinci, Codex D, folio 5 recto.

les yeux est la preuve que lumière et douleur sont de même nature »²³¹. Par ailleurs, la lumière dont il est question et qui pénètre dans l'œil est bien celle qui provient des objets. Il existe donc un lien entre l'œil, la lumière et l'objet dont elle est issue. Vinci opère ici une mise en cohérence entre les manifestations anatomiques de la pupille de l'œil et le rôle de la lumière dans la vision tel qu'il est envisagé par Alhazen. Il décrit ainsi l'adaptation de l'œil à la lumière qui permet, par exemple, de voir des objets faiblement éclairés lorsque la pupille est en mydriase (c'est-à-dire, complètement dilatée), ou encore d'éviter qu'un excès de lumière ne perturbe trop la vue :

Observe une pupille et fais-lui regarder la lumière que tu approcheras de lui peu à peu. Tu verras cette pupille se resserrer à mesure que la lumière approchera²³².

L'explication proposée par Vinci nous paraît fondamentale puisque celui-ci parvient à associer l'accommodation pupillaire à la quantité de lumière qui pénètre l'œil. La pupille devient un régulateur d'intensité lumineuse ; en changeant de forme, elle commande l'entrée dans l'œil de la lumière provenant des objets. Cette idée conforte la doctrine d'Alhazen en lui donnant en quelque sorte une légitimité anatomique.

Léonard de Vinci ne s'arrête pas à l'étude du rôle de la pupille. Contrairement à Alhazen, il considère la rétine, et non le cristallin, comme « l'organe enregistreur »²³³, c'est-à-dire comme le siège de la faculté visuelle :

Il est nécessaire que l'impression soit dans l'œil. Le nerf qui part de l'œil et va au cerveau est semblable aux cordes perforées qui, au moyen d'infinis petits rameaux, tissent la peau et par les pores se portent au sens commun²³⁴.

La rétine est décrite comme une surface concave blanc rougeâtre, située au niveau de l'émergence du nerf optique et non autour comme c'est le cas réellement. Le cristallin est pour Vinci un organe réfringent dans lequel il situe une intersection optique permettant la formation d'une image à l'endroit sur la rétine. Alors qu'il assimile l'œil à une chambre noire,

²³¹ Alhazen, Kitab, livre 1, chap. 6, 1107b.

²³² Léonard de Vinci, Codex D, folio 5.

²³³ Léonard de Vinci, Ms D, folio 2, verso.

²³⁴ Léonard de Vinci, Codex Arunfel, folio 172, recto. L'expression « sens commun » utilisée ici par Léonard de Vinci désigne la faculté sensitive ultime, commune à tous les sens, conformément à la tradition aristotélicienne.

Vinci ne parvient pas à formuler une explication géométrique de la vision satisfaisante²³⁵. En effet, il refuse l'idée qu'une image puisse se former à l'envers sur la rétine. Il imagine donc une double réfraction : une première dans le système cornée-pupille, une deuxième dans le cristallin :

La pupille de l'œil qui par une petite ouverture reçoit les images des corps placés devant cette ouverture les reçoit toujours à l'envers et toujours la faculté visuelle les voit droits comme ils sont. Et il arrive de la sorte que les dites images se redressent selon l'objet qui en est la cause et de là, elles sont prises par l'organe enregistreur et renvoyées au sens commun où elles sont piégées²³⁶.

Selon David Lindberg, l'influence de Léonard de Vinci sur l'évolution rationnelle des théories de la vision est négligeable. En effet, ses textes ne sont étudiés qu'à partir du 18^e siècle, bien après que Kepler ait énoncé sa théorie de la formation de l'image rétinienne. Pourtant, le fait que Vinci soit parvenu à rendre les idées d'Alhazen cohérentes avec ses propres considérations morphologiques oculaires nous semble particulièrement intéressant d'un point de vue didactique. En particulier, il nous paraît important d'associer l'étude du mécanisme de la vision avec une description anatomique de l'œil. En outre, s'il est vrai que les découvertes anatomiques de Vinci n'influencent guère la marche rationnelle de l'optique, celles toutes proches de Felix Plater (1536-1614) auront, elles, un impact fondamental.

Comme Vinci, Plater situe le siège de la perception visuelle sur la rétine. Selon les observations de cet anatomiste, la rétine, à la différence du cristallin, est physiquement liée au nerf optique qui lui-même est attaché au cerveau, entité capable de décoder l'information visuelle. Or il faut que la surface réceptrice de l'image soit en contact (direct ou indirect) avec le cerveau, ce qui est le cas de la rétine.

Le premier organe de la vision appelé nerf optique se prolonge à l'intérieur de l'œil en un hémisphère rétifforme. Celui-ci reçoit les *species* et les couleurs des objets qui, accompagnées par la lumière, pénètrent l'œil à travers la pupille²³⁷.

Quant au cristallin, Plater le considère uniquement comme un organe réfringent dont le rôle essentiel est de permettre au système formé par la rétine et le nerf optique de percevoir plus facilement les *species* des objets, de même qu'une lentille convergente permet de mieux

²³⁵ On trouvera une description complète de la chambre noire de Léonard de Vinci dans le Ms D folio 8 verso, ainsi que dans Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. 166-168.

²³⁶ Léonard de Vinci, Ms D, folio 2 verso.

²³⁷ Felix Plater, cité par David Lindberg, *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. p. 176.

distinguer les objets qui nous entourent. Plater n'apporte pas de solution géométrique au problème de la vision, mais il produit des descriptions de l'œil d'une grande précision comme le montre la planche suivante (Figure 25). Ces planches serviront de support à l'élaboration de la théorie de l'image rétinienne.

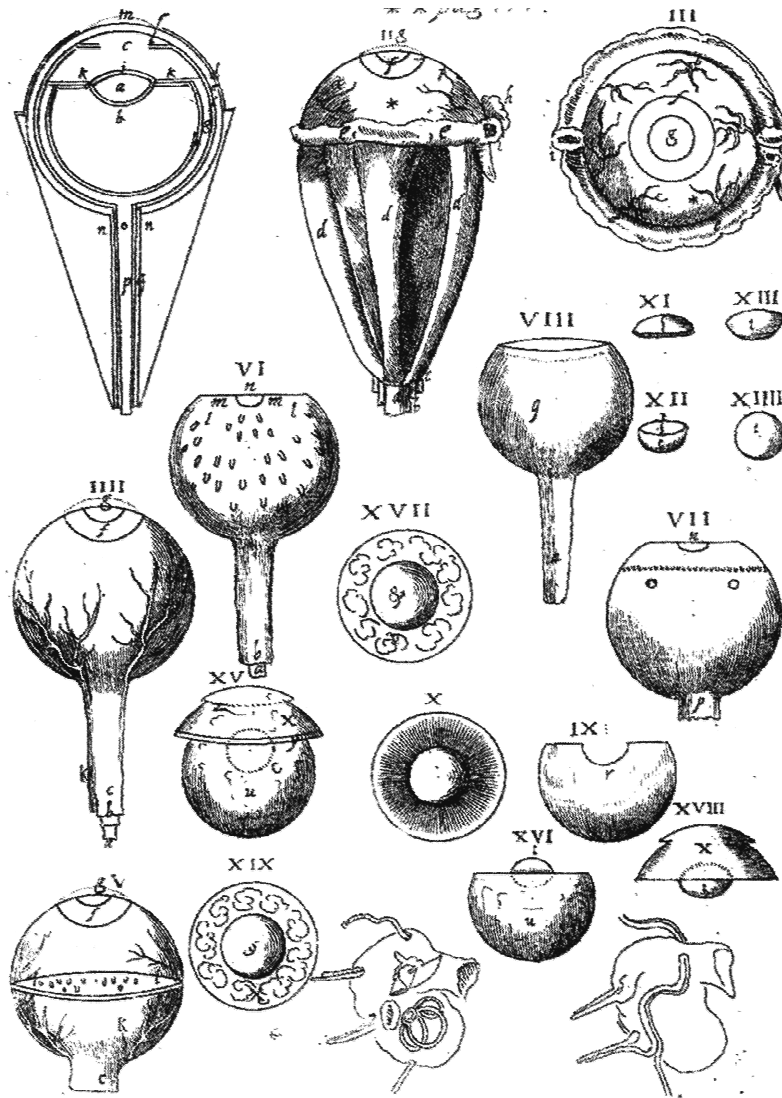


Figure 25 : Planches anatomiques de Felix Plater²³⁸

²³⁸ Planche anatomique de Felix Plater, cité par Kepler, *Paralipomènes à Vitellion*, chapitre V, 2, p. 330.

2.5. La vision dans la science classique occidentale

La science classique occidentale hérite d'une optique science de la lumière. Elle va s'attacher à améliorer, voire à modifier, les interprétations géométriques, physiologiques et psychologiques du mécanisme de la vision proposés par Alhazen, sans toutefois remettre en cause deux de ses principes fondateurs : d'une part que la vision procède de l'entrée dans l'œil de la lumière provenant des objets, d'autre part que la vision d'un objet résulte de la formation d'une image de cet objet dans l'œil par le jeu d'une correspondance point par point. Sur ces bases, Johannes Kepler (1571-1630) élabore une modélisation géométrique du phénomène de la vision tout à fait remarquable. Son ouvrage de 1604 intitulé *Paralipomènes à Vitellion* que nous nous proposons d'étudier, constitue une œuvre majeure de l'histoire de l'optique. Malgré tout, Kepler laisse certaines questions sans réponse, et il faudra attendre René Descartes (1596-1650) et son traité de *Dioptrique* (1637) pour que s'achève la mutation rationaliste entamée par l'histoire des théories de la vision quinze siècles auparavant.

2.5.1. Kepler et la formation de l'image rétinienne

L'optique de Kepler et, à travers elle, l'optique moderne qu'elle fonde, trouve son enracinement dans les idées d'Alhazen. Kepler dispose d'un éventail d'éléments conceptuels qu'il entreprend de considérer sous un jour nouveau. Les *Paralipomènes* constituent un recueil exhaustif des principes anciens (ceux d'Aristote et des intramissionnistes et ceux d'Alhazen relayés par Pecham et Vitellion), intégrés dans un nouveau système de pensée.

Kepler, héritier de l'optique médiévale

D'un point de vue phénoménologique, Kepler reconnaît que la vision est une passion²³⁹, et que la lumière provenant des objets en est le *stimulus* :

La vision est vivement attirée par les objets brillants et l'est peu par les objets ténus et évanescents. L'expérience en témoigne, la spécificité de la vision le démontre. Car sa destinée étant d'être mue par la lumière, elle sera mue par une lumière forte. **Mais être mû par la lumière, c'est voir**²⁴⁰.

²³⁹ « Comme la vision est une passion et que la passion se produit par contact, tout ce qui sera dit sera compris par référence à un contact ou à quelque cause de contact. Par contact, on entend ici celui entre les surfaces de l'œil et de l'espèce, ou des rayons qui découlent des objets », Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre III, proposition 1, p. 180. Nous nous référons à la traduction de C. Chevalley, Vrin, 1980.

²⁴⁰ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, proposition 3, p. 335. C'est nous qui soulignons.

Conformément au modèle proposé par Alhazen, cette lumière est, pour Kepler, un objet quantifiable dont il est possible de parler en termes de « plus ou moins » ou en termes de « fort ou faible » : « La lumière participe de la quantité et de la densité »²⁴¹. Selon son intensité elle provoque des effets différents sur l'œil : « La vision se règle sur le degré de l'éclairage »²⁴² ou encore, « l'œil a la sensation de la densité de lumière »²⁴³. Mais la lumière est aussi un objet géométrisable : « La lumière tombe sous les lois de la Géométrie »²⁴⁴. En outre, l'une des propriétés de la lumière est d'être renvoyée par les objets qu'elle éclaire :

Des objets éclairés à l'extérieur par une lumière quelconque teintent la lumière communiquée et la diffusent sphériquement tout autour²⁴⁵.

D'un point de vue anatomique, Kepler dispose des planches de Plater. Il reconnaît à la pupille la faculté de se dilater ou de se rétracter en fonction de la quantité de lumière entrant dans l'œil :

A la lumière, elle [la pupille] se resserre afin de refouler davantage de lumière pour éviter que celle-ci, étant trop forte, ne provoque une lésion dans l'organe du sens²⁴⁶.

Et comme Plater, Kepler considère la rétine comme le siège de la perception visuelle, c'est-à-dire, comme le lieu de formation de l'image optique :

Plater laisse la faculté de connaître dans la rétine, ce qui est en vérité plus logique (...). Je dis qu'il y a vision quand une représentation de l'ensemble de l'hémisphère du monde situé devant l'œil se fixe sur la paroi blanc roussâtre de la surface concave de la rétine²⁴⁷.

Enfin, d'un point de vue géométrique, les points et les rayons sont des outils de raisonnement qui relèvent d'une pure abstraction²⁴⁸. Pour Kepler, comme pour Alhazen, un objet est constitué d'un ensemble de points sans dimension. A partir de chacun des points de l'objet de la lumière est émise dans toutes les directions et se déplace le long de droites appelées

²⁴¹ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre I, proposition 3, p. 109.

²⁴² Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, proposition 3, p. 335.

²⁴³ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre III, proposition 12, p. 187.

²⁴⁴ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre I, proposition 1, p. 108.

²⁴⁵ Ibid. p. 169.

²⁴⁶ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, p. 328.

²⁴⁷ Ibid. 314-317.

²⁴⁸ Voir Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre I, propositions 1 à 8, 108-112.

« rayons » : « Tout point laisse la lumière s'écouler selon un nombre infini de lignes »²⁴⁹. De plus, le principe du stigmatisme est à l'origine de la formation de l'image optique. Enfin, les milieux réfringents affectent la propagation des rayons qui sont déviés selon les lois particulières de la réfraction : « la lumière qui tombe obliquement sur la surface d'un milieu plus dense est réfractée vers la perpendiculaire à la surface »²⁵⁰.

Par ailleurs, Kepler hérite d'une méthodologie de recherche particulière, celle de l'expérimentation. Nous l'avons vu précédemment, le *Kitab* d'Alhazen est construit autour d'un grand nombre d'expériences réalisées pour la plupart en chambre noire. Kepler va lui-aussi utiliser la chambre noire, mais contrairement à Alhazen, il en fait un véritable objet d'étude et c'est par ce biais qu'il parvient à assimiler son fonctionnement à celui de l'œil humain.

S'il est vrai que Kepler ne dispose guère de plus d'éléments conceptuels qu'Alhazen, il n'en demeure pas moins qu'il parvient à faire de ces éléments les fondements d'une nouvelle et ultime explication géométrique du mécanisme de la vision. Mais les motivations de Kepler ne sont pas endogènes, en ce sens qu'elles ne s'inscrivent pas dans le contexte d'un questionnement optique. Si Kepler s'intéresse à l'optique et en particulier à la vision, c'est pour répondre aux exigences d'une astronomie en pleine renaissance :

Les astronomes mettent au fondement de leur science les diamètres lunaires et les éclipses solaires ; or il se produit dans la vision une certaine tromperie, qui naît pour une part du procédé d'observation, et pour une autre part, de la simple vision elle-même : tant que cette dernière n'est pas dissipée, elle crée des difficultés considérables aux expérimentateurs et diminue la portée de leurs jugements. L'occasion de cette erreur de la vision doit donc être recherchée, et ce dans la conformation et les fonctions de l'œil lui-même²⁵¹.

Selon Kepler, l'astronomie ne peut pas évoluer si le mystère de la vision n'est pas éclairci. Il s'attelle à cette tâche, et propose, sous le couvert d'une discipline connexe, une nouvelle interprétation géométrique de la vision. L'étude du fonctionnement de la chambre noire constitue la clé de voûte de cette interprétation.

²⁴⁹ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre 1, proposition 2, p. 108.

²⁵⁰ Ibid. Proposition 20, p. 119.

²⁵¹ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, p. 303.

Kepler et la chambre noire

Dans le chapitre II des *Paralipomènes* intitulé « Des figures formées par la lumière », Kepler montre que la raison qui fait diminuer le diamètre de la lune mesuré pendant une éclipse solaire observée sur l'écran d'une chambre noire par rapport au même diamètre mesuré en pleine lune n'est pas liée à un phénomène astronomique particulier, mais au fonctionnement intrinsèque de la chambre noire. Autrement dit, la diminution du diamètre de la lune pendant l'éclipse n'est pas due à une dilatation périodique de l'astre, mais au fonctionnement de l'instrument d'observation utilisé qui, jusqu'alors, n'a pas été étudié. En réalité, c'est la figure obtenue sur l'écran de la chambre noire qui diminue (Kepler la nomme « peinture »), et non la lune elle-même. L'explication du fonctionnement de la chambre noire repose sur le modèle géométrique de la propagation de la lumière et de la diffusion adopté par Kepler selon lequel un objet est un ensemble de points qui envoient de la lumière dans toutes les directions suivant une propagation rectiligne représentée par des rayons. A l'aide de ce modèle Kepler montre que si une source lumineuse est large et que l'orifice de la chambre noire est ponctuel alors on obtient sur l'écran de la chambre une peinture identique à la source, mais inversée par rapport à celle-ci (Figure 26) :

Si la fenêtre pouvait être un point mathématique, la lumière reproduirait très exactement sur l'écran disposé perpendiculairement la figure de la surface lumineuse, mais renversée²⁵².

Si au contraire la source est ponctuelle et l'ouverture de la chambre relativement large alors la peinture obtenue sur l'écran de la chambre aura la forme de l'ouverture. De plus, si la source est très éloignée de l'ouverture alors la taille de la peinture sera identique à celle de l'ouverture (Figure 26) :

Si la source lumineuse ponctuelle est unique et si celle-ci est éloignée de l'écran et de l'ouverture alors la lumière représentera sur l'écran disposé perpendiculairement non seulement la figure mais aussi la grandeur de la fenêtre qu'elle a traversé perpendiculairement²⁵³.

²⁵² Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre II, proposition 3, p. 158.

²⁵³ Ibid. Proposition 2, p. 157.

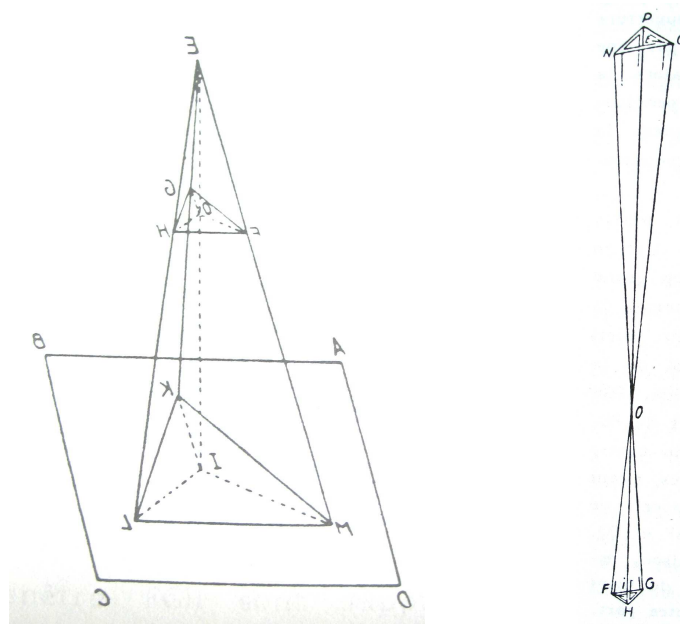


Figure 26 : Kepler : fonctionnement de la chambre obscure²⁵⁴. A gauche, la figure KLM de la source ponctuelle E a la forme de l'ouverture FGH de la chambre. A droite, la figure FGH de la source large NOP à travers l'ouverture ponctuelle Q a la forme de la source NOP.

Mais dans le cas particulier de l'observation en chambre noire de l'éclipse de Soleil, ni le Soleil ni la Lune ne sont des sources ponctuelles. Quant à l'ouverture de la chambre, elle ne peut être réduite à un point et demeure donc de dimension non négligeable. Par conséquent, chacun des points de la source envoie un cône de rayons (et non un rayon unique) à travers l'ouverture de la chambre ; à un point de la source correspond une tache (et non un point) ; la juxtaposition et le chevauchement de ces taches sur l'écran de la chambre forment la peinture observée qui n'est donc pas isomorphe de la source elle-même.

Lorsque la Lune occulte le Soleil, chacun des points du croissant solaire envoie un cône selon le principe décrit ci-dessus. Par conséquent, la peinture du croissant est plus large et la peinture de la Lune paraît donc plus petite (Figure 27).

²⁵⁴ Kepler, Paralipomènes, chapitre II, proposition 2 et 3, pp.157-158.

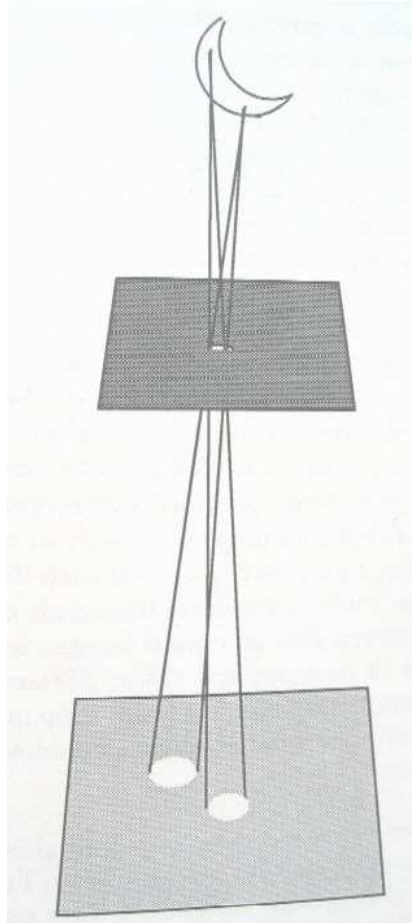


Figure 27 : Interprétation géométrique de la figure obtenue dans une chambre noire lors d'une éclipse de Soleil selon le modèle de Kepler²⁵⁵. A chaque point de la partie non dissimulée du Soleil correspond une tache sur l'écran de la chambre noire.

En découvrant la physique de la chambre noire, Kepler ouvre la voie à une nouvelle interprétation géométrique de la vision. En effet, il assimile l'ouverture de la chambre à la pupille et la rétine à l'écran sur lequel se forme la figure des objets, et imagine que ce qui se passe dans la chambre noire doit se passer pareillement dans l'œil²⁵⁶. Ainsi, pour Kepler la vision résulte-t-elle de l'entrée dans l'œil d'un faisceau et non d'un rayon unique (Figure 28 :) :

²⁵⁵ Dessin proposé par David Park, *The fire within the eye*, op. cit. p. 85.

²⁵⁶ Kepler reprend les expériences réalisées avant lui par Giovanni Battista Della Porta (1535-1615) dans lesquelles le fonctionnement de l'œil est assimilé à celui d'une chambre noire miniature. Della Porta ajoute devant le petit orifice d'entrée une lentille de verre mais ne parvient pas pour autant à élaborer un modèle géométrique permettant d'expliquer la vision. Kepler reprend donc la métaphore instrumentale de Della Porta. Voir Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, 3, 341-362.

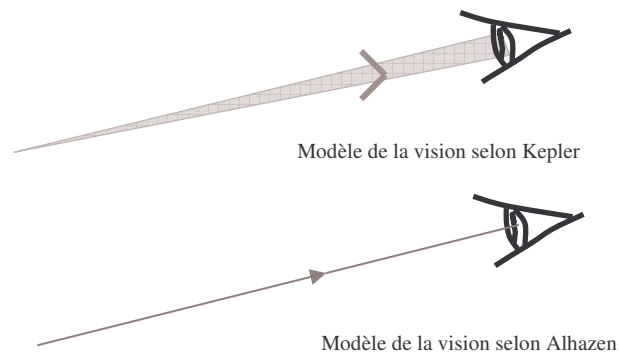


Figure 28 : Proposition schématique de la vision selon le modèle d'Alhazen (un rayon unique issu d'un point de l'objet pénètre l'œil) et de Kepler (un faisceau issu d'un point de l'objet pénètre l'œil à travers la pupille).

Mais si l'on accepte le fait que tous les rayons du faisceau entrant dans l'œil participent à la vision, comment expliquer le stigmatisme, c'est-à-dire le fait qu'à un point de l'objet correspond un point de la figure formée sur la rétine ? En effet, si l'on souhaite que la peinture formée sur l'écran de la chambre soit la plus nette possible, il est nécessaire de faire en sorte que les taches empiètent le moins possible les unes sur les autres. De façon corrélative, la seule façon d'obtenir une peinture parfaitement nette est d'utiliser un dispositif convergent qui rassemble le cône émis par un point-source en un point. L'idée du stigmatisme déjà présente chez Alhazen est entièrement repensée par Kepler²⁵⁷. A un point-source doit correspondre un point-image par l'intermédiaire d'un faisceau de rayons et non plus d'un rayon unique comme c'était le cas chez Alhazen. Afin d'illustrer son propos, Kepler a l'idée de placer un dispositif convergent (une sphère remplie d'eau) devant l'entrée de l'ouverture

²⁵⁷ Rappelons à ce sujet qu'Alhazen envisage la vision comme le résultat d'une correspondance point par point par l'intermédiaire d'un rayon unique. Outre le fait que ce modèle ne permet pas de déterminer la distance qui sépare l'œil de l'objet vu, il nécessite également de ne retenir qu'un rayon unique par point (celui qui pénètre l'œil perpendiculairement à sa surface) alors que c'est un faisceau complet de rayons qui, issu d'un point de l'objet, parvient à l'œil. Or, d'après Kepler, il n'y a pas de raison pour opérer une quelconque discrimination entre un rayon perpendiculaire et son premier voisin à peine oblique. Ce dernier, faiblement incliné sera faiblement réfracté ; et si l'on adopte un raisonnement mécaniste, il ne sera donc que très peu affaibli et possèdera suffisamment de vigueur pour pénétrer l'œil à son tour : « Si l'on considère que Vitellion forme son simulacre avec les seules perpendiculaires, il est monstrueux qu'il distingue si subtilement les perpendiculaires des lignes qui en sont très proches. Si la lumière agit sur le sens, et si le sens pâtit par cette action, il pâtira donc violemment d'une action vigoureuse. Or, pour ce qui est d'éclairer, il n'y a presque aucune différence entre les perpendiculaires et leurs voisins immédiates, du fait que ces dernières ne sont presque pas réfractées. La passion, c'est-à-dire la sensation, est ainsi presque égale, qu'elle soit le fait de perpendiculaires, ou de lignes très proches d'elles », Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, p. 367.

de la chambre noire. Ce faisant, il constate que la figure obtenue sur l'écran de la chambre noire est bien plus nette qu'auparavant. L'explication qui accompagne cette expérience est tout à fait éclairante, comme le montre la Figure 29 ci-après :

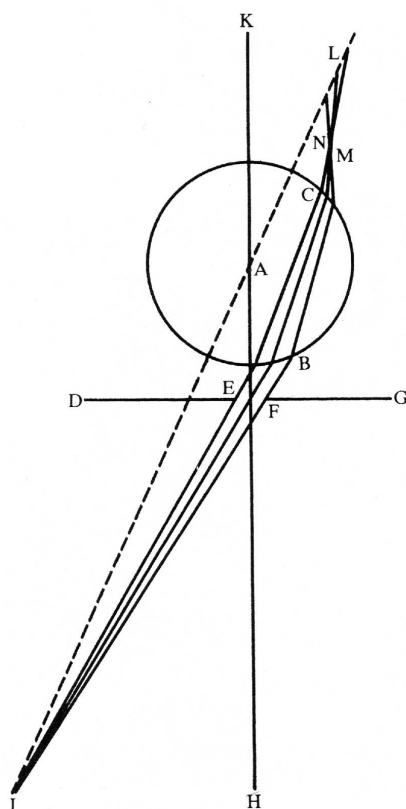


Figure 29 : Kepler, formation d'une image à travers une sphère transparente²⁵⁸. A un point I de l'objet correspond un point-image M sur l'écran par le jeu d'une double réfraction à la surface de la sphère d'eau.

Kepler, qui ne dispose d'aucune analyse des lentilles satisfaisante, élabore donc sa propre théorie en utilisant le principe de la double réfraction, et en se limitant aux images formées par les sphères transparentes auxquelles il associe une petite ouverture²⁵⁹. Et comme ce qui se passe dans la chambre noire doit se passer pareillement dans l'œil, Kepler assimile la sphère d'eau au cristallin qui devient le dispositif convergent de l'œil, permettant ainsi la formation d'une image punctiforme sur la rétine :

²⁵⁸ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, proposition 23, p. 356.

²⁵⁹ Si les lentilles sont connues et utilisées depuis plus de 650 ans (on attribue l'invention de la lentille au savant arabe Ibn Sahl), elles n'ont jusqu'alors fait l'objet d'aucune étude physique particulière.

Presque tout ce que l'on a dit jusqu'à présent du cristallin s'observe couramment au hasard d'expérimentations faites avec des boules de cristal et des urinaux de verre remplis d'eau claire²⁶⁰.

Kepler et la formation de l'image rétinienne

Kepler parvient à respecter le principe de la décomposition punctiforme élaboré par Alhazen en n'opérant aucune discrimination entre les rayons. Tous les rayons issus d'un point d'un objet dans le champ visuel et arrivant sur la pupille, pénètrent l'œil et sont conduits par réfraction à se rencontrer en un point sur la rétine. Une image inversée est créée sur la rétine, de la même façon qu'une image inversée se forme sur l'écran d'une chambre obscure. Cette image rétinienne existe indépendamment de l'observateur.

Ainsi donc, d'un point-objet part un faisceau de rayons divergents. Du moment que le cristallin est assez convergent, il se forme dans l'œil une image ponctuelle, et la question ne se pose pas en termes différents que s'il s'agissait d'une image formée sur l'écran d'une chambre noire munie d'une sphère remplie d'eau (Figure 30) :

La vision se fait donc par une peinture de l'objet visible sur la paroi blanche et concave de la rétine (...). Je dis que cette peinture se compose d'autant de paires de cônes qu'il y a de points dans l'objet vu, deux cônes ayant toujours comme base commune la largeur du cristallin ou l'une de ses parties : de sorte que l'un des cônes ait son sommet au point vu et sa base dans le cristallin (tout en étant un peu modifié par la réfraction en entrant dans la cornée), tandis que l'autre cône a sa base commune avec le premier, dans le cristallin, mais atteint en son sommet un point de la peinture sur la surface de la rétine ; lui aussi souffre une réfraction à sa sortie du cristallin²⁶¹.

²⁶⁰ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, 3, p. 333.

²⁶¹ Ibid. p. 320.

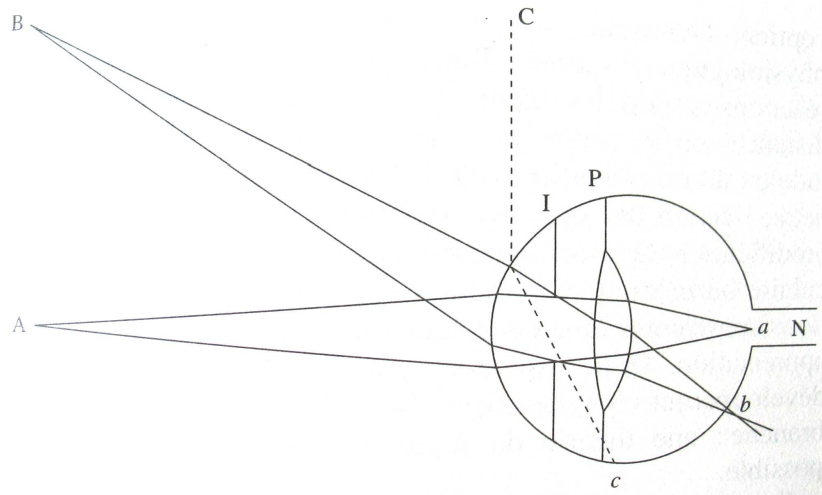


Figure 30 : La vision selon Kepler²⁶². A un point A correspond un point a sur la rétine par l'intermédiaire de faisceaux divergents puis convergents.

En revanche, si à chaque point de l'objet correspond pour l'image, non plus un point, mais une tache d'une certaine surface, les taches placées côte à côte empiètent les unes sur les autres, et l'image obtenue est floue.

D'après David Lindberg, la théorie képlérienne de l'image rétinienne est l'aboutissement inévitable de la recherche rationnelle d'un esprit maniant habilement la géométrie du rayon, et dont les connaissances sont identiques à celles que Kepler possédait avant ses propres investigations : principe de la diffusion et de la réfraction, vision due à la réception dans l'œil de la lumière issue d'un objet, analyse punctiforme, stigmatisme et anatomie de l'œil. Selon Lindberg, ces connaissances suffiraient, quoiqu'il arrive, à aboutir à des résultats identiques à ceux de Kepler²⁶³. Cela n'enlève rien à la rigueur extrême de Kepler, à son obstination à proposer une théorie cohérente. En outre, le traitement géométrique proposé par Kepler devient parfaitement compatible avec une analyse plus quantitative de la vision, analyse initiée quelques siècles auparavant par Alhazen.

²⁶² Simon G. *Archéologie de la vision*, op. cit. p. 215.

²⁶³ Lindberg D. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, op. cit. p. 206.

Kepler et le traitement quantitatif de la vue

Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, Kepler reprend à son compte la découverte d'Alhazen selon laquelle la lumière est le sensible de la vue. Il confirme également l'idée que les effets de la lumière sur la vue dépendent de la quantité de lumière que l'œil reçoit. Il adopte à son tour un raisonnement quantitatif :

Un œil seul peut percevoir et comparer les distances des points de l'objet vu, si ces distances sont dans un rapport perceptible avec le diamètre de l'œil, en s'aidant des facultés plus profondes et en se servant comme un instrument des passions des humeurs de l'œil causées par la densité de la lumière²⁶⁴.

Le terme « densité » utilisé par Kepler renvoie sans aucun doute au traitement quantitatif proposé par Alhazen. Pour Kepler, « les passions des humeurs de l'œil » dépendent de la densité de lumière, de même que la vision chez Alhazen dépend de la quantité de lumière qui pénètre l'œil. Comme Alhazen, Kepler admet que la lumière peut être traitée en termes de « plus ou moins ». En particulier, il montre que la densité lumineuse décroît à mesure que le faisceau divergent émis par un point-source se disperse comme l'indique la représentation proposée par David Park (Figure 31) :

²⁶⁴ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre 3, proposition 14, p.188.

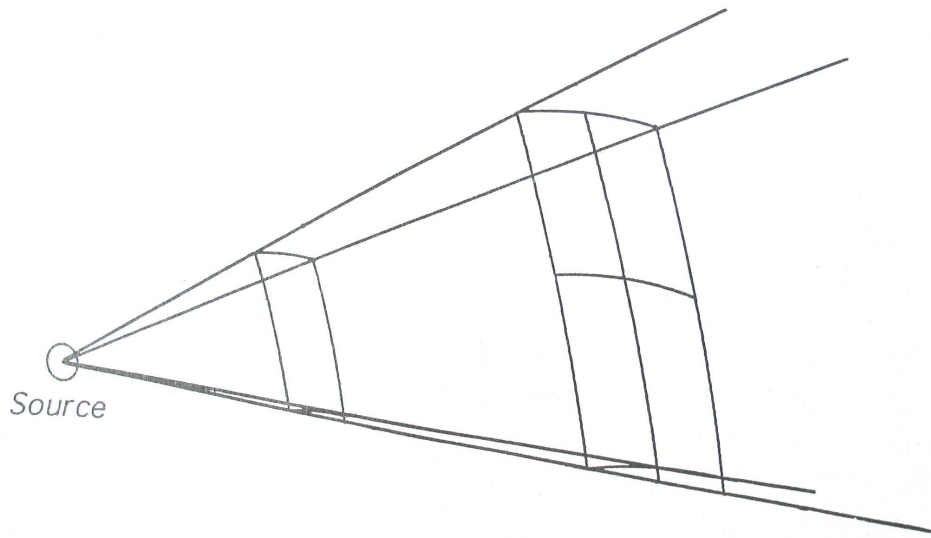


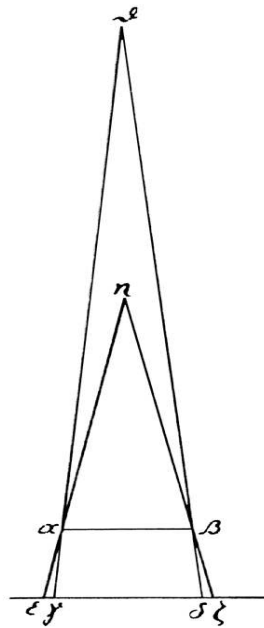
Figure 31 : La densité lumineuse de la surface la plus éloignée du point-source est quatre fois moins importante que celle de la seconde surface²⁶⁵.

En outre, Kepler admet que l'œil est un détecteur de densité de lumière ; mais contrairement à Alhazen, il propose une interprétation géométrique de cette idée tout à fait remarquable. En effet, pour Kepler, la densité de lumière reçue par l'œil est en rapport direct avec la distance entre l'œil et l'objet vu, c'est en tout cas ce qu'il démontre au paragraphe XIV du chapitre III des *Paralipomènes* :

Soit $\alpha\beta$ le diamètre de la pupille ; $\chi\delta$ lui est parallèle et à la même distance que celle dont pâtit la profondeur de l'œil. Ainsi, $\alpha\chi$ et $\delta\beta$ se dispersent à partir des bornes α et β avec une certaine inclinaison que celle de $\alpha\epsilon$ et $\beta\zeta$; $\chi\alpha$ et $\beta\delta$ se couperont donc en θ assez loin, tandis que $\epsilon\alpha$ et $\zeta\beta$ se couperont dans la source plus proche η (...). Par conséquent, puisque l'œil connaît le diamètre $\alpha\beta$ et la profondeur $\alpha\chi$, et qu'il suffit d'observer le rapport de $\delta\chi$ à $\zeta\epsilon$, ceci, soit par l'atténuation de la lumière, soit au moyen de la petite portion éclairée de la surface interne, il observera donc également $\alpha\eta$ et $\alpha\theta$; et il ne le fera pas en calculant, mais en comparant les distances des choses²⁶⁶.

²⁶⁵ Park D. *The fire within the eye*, op. cit. p. 161.

²⁶⁶ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre III, proposition 14, 188-189.

Figure 32 : Le triangle distanciométrique de Kepler²⁶⁷

En d'autres termes, la luminosité décroît avec l'éloignement, ce qui se caractérise, dans l'œil, par une diminution de la surface éclairée : plus la distance entre le point θ de l'objet et la pupille $\alpha\beta$ est grande et plus la surface $\epsilon\zeta$ éclairée est petite. C'est donc la variation de la luminosité à l'intérieur de l'œil qui permet à celui-ci d'évaluer la distance qui le sépare de l'objet vu. Les points α, θ, β , forment un triangle isocèle, dont le sommet est un point de l'objet, triangle que Kepler baptise « triangle distanciométrique » (Figure 32) :

Lorsque nous estimons la distance de l'objet, on peut également considérer le triangle distanciométrique dans un seul œil, de telle sorte que son sommet soit en un point de l'objet vu et sa base dans la largeur de la pupille²⁶⁸.

Notons que si l'angle $\alpha\theta\beta$ est nul, tous les rayons issus de θ sont confondus et perpendiculaires à $\alpha\beta$. Dans ce cas, cet unique rayon ne suffit pas à délimiter une surface éclairée, ou plus justement, ce rayon délimite une surface éclairée infinitésimale et identique pour tous les points θ du rayon, quelle que soit la distance séparant l'objet de la pupille. Un rayon unique ne permet donc pas d'évaluer la distance à l'objet vu, ce qui demeurerait l'une des principales difficultés du modèle géométrique proposé par Alhazen.

²⁶⁷ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre III, proposition 9, p. 184.

²⁶⁸ Ibid.

C'est bien une explication du mécanisme de la vision totalement repensée que nous propose Kepler dans les *Paralipomènes*. La vision résulte de l'entrée dans l'œil d'un ensemble de faisceaux divergents de lumière à partir de tous les points d'un objet éclairé. Par le jeu d'une double réfraction, les faisceaux qui pénètrent l'œil sont rassemblés sur la rétine en un ensemble de points-image qui forment l'image de l'objet vu. En proposant une formulation inédite des découvertes antérieures, Kepler s'invite en fondateur génial des théories de la vision. Pourtant, certaines questions demeurent sans réponse. En particulier, Kepler laisse le soin à ses successeurs d'expliquer la façon dont s'opère la perception de l'image rétinienne :

Quant à savoir comment cette reproduction ou cette peinture se lie aux esprits visuels qui ont leur siège dans la rétine et dans le nerf et si c'est amené par ces esprits à l'intérieur des cavités du cerveau qu'elle comparaît devant le tribunal de l'âme ou de la faculté visuelle, ou bien si c'est la faculté visuelle qui, telle un Questeur délégué par l'âme, descend du prétoire du cerveau jusque dans le nerf visuel et la rétine, qui sont comme des tribunaux inférieurs, et s'avance à la rencontre de la représentation, tout, dis-je, je laisse au physiciens le soin d'en disserter²⁶⁹.

L'explication képlérienne du mécanisme de la vision s'arrête donc à la rétine. Quelques années plus tard Descartes résoudra l'énigme posée par Kepler ouvrant ainsi la voie à ce qu'il est convenu d'appeler la physiologie de la vision.

2.5.2. La théorie cartésienne de la vision

Jusqu'à Descartes, la faculté visuelle consiste en la mise en présence d'une image lumineuse et colorée, c'est-à-dire d'une réplique de l'objet avec une instance sentante. Selon cette conception, la cause et l'effet sont de nature identique. Tant que l'agent s'assimile au patient, la causalité qui régit le mécanisme de la vision consiste en une transmission des qualités de l'objets (couleur, lumière, forme...) et non en une succession de phénomènes distincts comme c'est effectivement le cas. Que l'instance sentante soit identifiée au cristallin par Alhazen ou à la rétine par Kepler, sa propriété est de transformer le visible en du vu et d'associer le sentant au senti. Autrement dit, l'instance sentante transforme l'image du visible en une image vue, c'est-à-dire en une image intelligible. Pour Alhazen, cette image est ensuite transmise telle

²⁶⁹ Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, 2, p. 317. Signalons qu'avant Kepler la question de la perception semble d'ores et déjà résolue. En effet, pour Alhazen, le cristallin en tant qu'organe récepteur de l'image est lui-même le siège de la perception visuelle et possède la propriété de transformer le visible en du vu. L'image formée sur le cristallin est transmise en bon ordre au cerveau considéré comme « la faculté sentante suprême » par l'intermédiaire des nerfs optiques supposés creux : « La forme à la surface du cristallin s'étend dans le corps du cristallin (...). A partir de la forme venant dans le nerf commun, la faculté sentante suprême comprend les formes du visible ». Alhazen, *Kitab*, chapitre 6, 68, p. 84.

quelle au siège ultime de la perception, c'est-à-dire, au cerveau, par l'intermédiaire du nerf optique (supposé creux). Kepler quant à lui s'interroge sur les modalités de transmission de l'image depuis la rétine jusqu'au siège de la faculté visuelle : est-ce que « les esprits visuels qui résident dans la rétine » convoient l'image jusqu'au siège de la faculté visuelle, ou au contraire, cette faculté visuelle ne vient-elle pas à la rétine afin « de procéder sur place à l'examen »²⁷⁰ de l'image rétinienne ? Ainsi que nous l'indiquions précédemment, Kepler laisse aux « physiciens » le soin de répondre à cette question²⁷¹. Quoi qu'il en soit, chez Alhazen comme chez Kepler, l'image formée sur l'organe récepteur est directement reconnaissable en ce sens qu'elle possède toutes les propriétés lumineuses et colorées de l'objet dont elle est issue. En refusant l'idée d'une transmission nerveuse au cerveau d'une image globale formée sur la rétine, Descartes est amené à repenser le problème de la vision sous un jour nouveau. Avec lui, c'est toute la conception de la causalité dans le mécanisme de la vision qui se transforme.

Mais avant d'analyser la façon dont Descartes résout le problème de la perception visuelle, nous souhaitons nous attarder quelque peu sur les six premiers discours de la *Dioptrique* dans lesquels Descartes reprend la théorie képlérienne de la formation de l'image rétinienne sans en modifier le fond, mais en en proposant une schématisation particulièrement attractive²⁷².

Descartes relecteur de Kepler

La *Dioptrique* débute par un chapitre consacré au phénomène de la diffusion. Par le biais d'une analogie mécaniste (le mouvement de la lumière est assimilé à celui d'une balle), Descartes précise la différence entre réflexion et diffusion (Figure 33) dans un paragraphe qui n'est pas sans rappeler les propos d'Alhazen :

²⁷⁰ L'expression est ici emprunté à Gérard Simon qui décrit la problématique de la perception visuelle chez Alhazen et Kepler avec une clarté tout à fait remarquable. Voir Simon G. *Archéologie de la vision*, op. cit. 226-231.

²⁷¹ Kepler se heurte en réalité à deux difficultés majeures. La première est qu'il découvre que l'image rétinienne se forme non pas dans le prolongement du débouché du nerf optique, mais autour de celui-ci ; la deuxième, est que les nerfs optiques sont décrits comme étant « étroits, tortueux et obscurs ». Dans ces conditions, comment envisager une transmission intégrale et en bon ordre d'une image ? Voir Kepler J. *Paralipomènes*, chapitre V, 2, 317-318.

²⁷² Descartes R. *Dioptrique* (1637), *Corpus des œuvres de philosophie en langue française*, Fayard, Paris, 1987, 71-208.

Les rayons doivent bien être ainsi toujours imaginés exactement droits, lors qu'ils ne passent que par un seul corps transparent, qui est partout égal à lui-même : mais lorsqu'ils rencontrent quelques autres corps, ils sont sujets à être détournés par eux, ou amortis, en même façon que l'est le mouvement d'une balle, ou d'une pierre jetée en l'air, par ceux qu'elle rencontre. (...) Comme vous voyez ici, les balles ABC, qui, après avoir rencontré les superficies des corps DEF, se réfléchissent vers GHI. Et si ces balles rencontrent une superficie inégale, comme L, ou M, elles se réfléchissent vers divers côtés, chacune selon la situation de l'endroit de cette superficie qu'elle touche. (...) Or il faut penser en même façon qu'il y a des corps qui, étant rencontrés par les rayons de lumière les amortissent, et leur ôtent toute leur force, à savoir ceux qu'on nomme noirs, lesquels n'ont point d'autre couleur que les ténèbres. Et qu'il y a en a d'autres qui les font réfléchir, les uns au même ordre qu'ils les reçoivent, à savoir ceux qui ayant leur superficie toute polie peuvent servir de miroirs tant plats que courbes, et les autres confusément vers plusieurs côtés. (...) Et il me suffit ici de vous avertir que les rayons qui tombent sur les corps qui sont colorés et non polis, se réfléchissent ordinairement de tout côté. (..) Comme encore que ceux qui tombent sur la superficie du corps blanc AB ne viennent que du flambeau C, ils ne laissent pas de se réfléchir tellement de tout côté, qu'en quelque lieu qu'on pose l'œil, comme par exemple vers D, il s'en trouve toujours plusieurs venant de chaque endroit de cette superficie AB²⁷³.

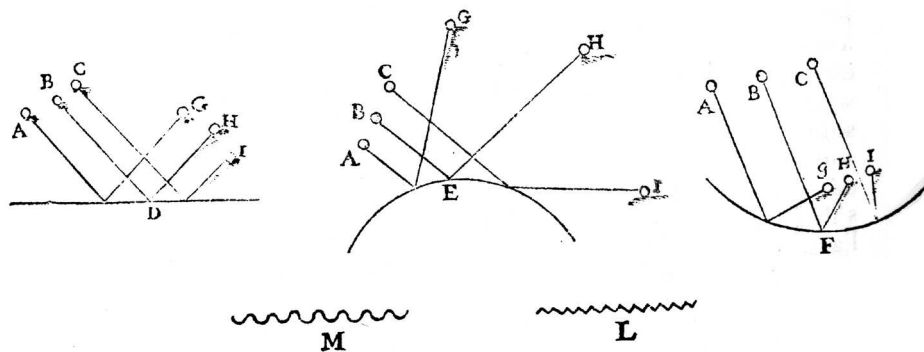


Figure 33 : Schématisation de la diffusion proposé par Descartes²⁷⁴. Dans le cas d'une surface lisse et plane D, les rayons sont renvoyés dans une direction privilégiée. Dans le cas d'une surface convexe E, les rayons divergent ; dans le cas d'une surface concave F, les rayons convergent. Les surfaces « inégales » (ou rugueuses) M et L peuvent renvoyer les rayons dans des directions aléatoires.

Comme Alhazen, Descartes considère qu'une surface rugueuse renvoie la lumière dans toutes les directions, contrairement aux surfaces lisses qui elles réfléchissent chaque rayon selon une direction déterminée. Au livre second de la *Dioptrique*, Descartes développe les lois de la réfraction et conclut son chapitre en proposant une analogie entre la réfraction observée à travers une sphère transparente et le fonctionnement de l'œil (Figure 34) :

La réfraction des rayons AB, AC et AD, qui venant du flambeau A, tombent sur la superficie courbe de la boule de cristal BCD, doit être considérée en même sorte que si AB

²⁷³ Ibid. 76-81.

²⁷⁴ Ibid. p. 80.

tombait sur la superficie plate EBF. D'où vous voyez que ces rayons se peuvent assembler ou écarter diversement, selon qu'ils tombent sur des superficies qui sont courbées diversement. Et il est temps que je commence à vous décrire qu'elle est la structure de l'œil, afin de vous pouvoir faire entendre comment les rayons, qui entrent dedans, s'y disposent pour causer la sensation de la vue²⁷⁵.

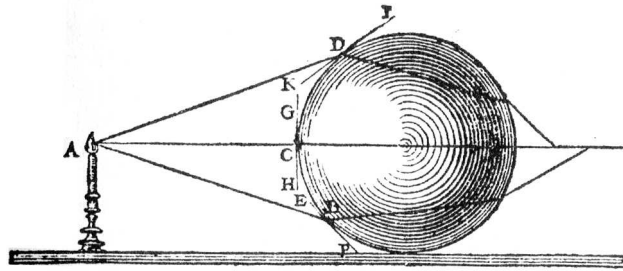


Figure 34 :Schéma de Descartes représentant la marche des rayons à travers une sphère transparente²⁷⁶. Les rayons issus de A subissent deux réfraction consécutives.

La démarche analogique de Kepler est reprise intégralement par Descartes qui propose une étude de la sphère transparente afin d'introduire celle de l'œil.

Les discours troisième et quatrième sont consacrés respectivement à l'anatomie de l'œil et à une étude générale des sens (nous reviendrons sur ce quatrième chapitre un peu plus avant). Puis, au discours cinquième, Descartes nous offre une représentation remarquable de précision pour illustrer la formation de l'image rétinienne (Figure 35) :

Considérez donc que de chaque point des objets VXY, il entre en cet œil autant de rayons, qui pénètrent jusqu'au corps blanc RST, que l'ouverture de la prunelle FF en peut comprendre, et que suivant ce qui a été dit ci-dessus, tous ceux de ces rayons, qui viennent d'un même point, se courbent en traversant les trois superficies BCD, 123 et 456 en la façon qui est requise pour se rassembler derechef exactement en l'un des points du corps blanc RST²⁷⁷.

²⁷⁵ Ibid. p.93.

²⁷⁶ Ibid.

²⁷⁷ Ibid. 105-106.

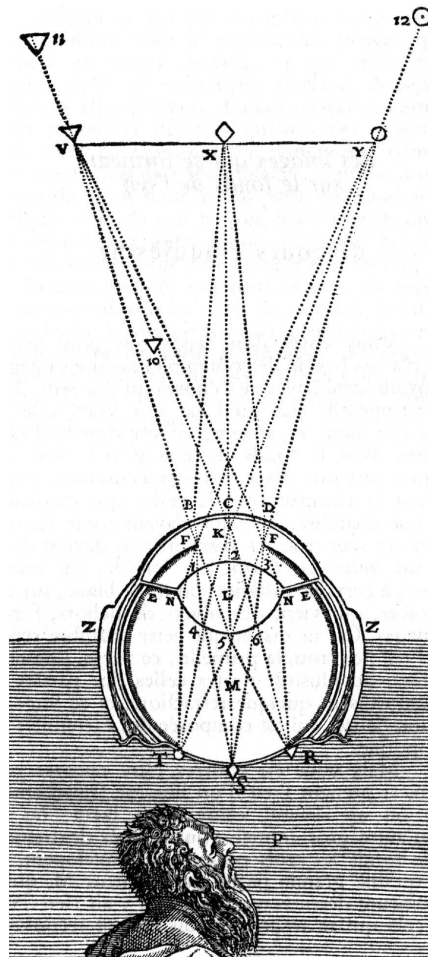


Figure 35 : La vision selon Descartes²⁷⁸. Aux points-objets VXY correspondent trois points-images RST sur la rétine.

Descartes s'intéresse donc à l'interprétation géométrique de la vision, mais comme ses prédécesseurs, il va également s'attacher à considérer les effets quantitatifs de la lumière sur la vue. Car le fait que la lumière soit le *stimulus* de la vue est désormais tenu pour acquis :

Ainsi, faut-il avouer que les objets de la vue peuvent être sentis (...) par le moyen de l'action qui, étant en eux, tend vers les yeux (...). Cette action n'est autre chose que la lumière (...) et l'ordinaire des hommes ne voit que par l'action qui vient de cet objet²⁷⁹.

²⁷⁸ Ibid. p. 104. Afin de justifier son propos, Descartes invite le lecteur à réaliser l'expérience suivante : « Prenez l'œil d'un homme fraîchement mort, ou à défaut celui d'un bœuf, ou de quelque autre animal. Coupez dextrement vers le fond les trois peaux qui l'enveloppent, en sorte qu'une grande partie de l'humeur M qui y est demeure découverte, sans qu'il y ait rien d'elle pour cela qui se répande. Puis l'ayant recouverte de quelque corps blanc, qui soit si délié que le jour passe au travers, comme par exemple un morceau de papier ou de la coquille d'un œuf, RST, que vous mettiez cet œil dans le trou d'une fenêtre fait exprès, comme Z, en sorte qu'il y ait le devant de BCD tourné vers quelque lieu où il y ait divers objets comme VXY éclairés par le Soleil ». Descartes poursuit en disant que si un observateur P le place derrière RST alors il verra se former sur la feuille de papier l'image de l'objet éclairé VXY. Descartes R. *Dioptrique*, op. cit. p. 105.

²⁷⁹ Ibid. p. 75.

Descartes et le traitement quantitatif de la vision

Dans un chapitre consacré à l'anatomie de l'œil, Descartes reprend l'idée que la forme de la pupille dépend de la quantité de lumière qui pénètre l'œil. En s'appuyant sur un schéma de l'œil à la fois simple et clair (Figure 36), Descartes précise que : « Le petit trou rond FF, qui est ce qu'on nomme la prunelle, paraît noir au milieu de l'œil quand on le regarde par dehors »²⁸⁰. Et il poursuit :

Ce trou n'est pas toujours de même grandeur, et la partie EF de la peau en laquelle il est (...) semble être comme un petit muscle, qui se peut rétrécir et élargir à mesure que l'on regarde les objets plus ou moins proches, ou plus ou moins éclairés²⁸¹.

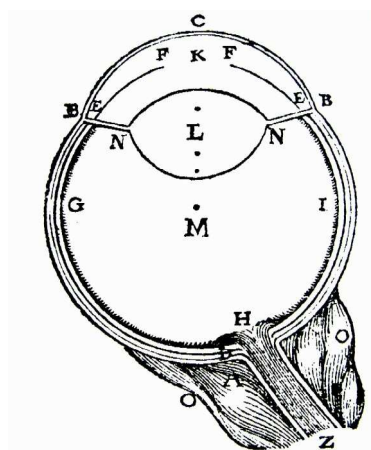


Figure 36 : Dessin de l'œil proposé par Descartes²⁸². L désigne le cristallin, GHI la rétine, FF, la prunelle, BC la cornée, M, l'humeur vitrée.

L'œil réagit donc à la quantité de lumière qui le pénètre. Cette idée est reprise de façon bien plus explicite au chapitre 6. Comme Alhazen, Descartes assimile les effets d'une lumière trop forte à ceux de la douleur. Pourtant, l'interprétation qu'il propose de ce phénomène est non seulement totalement inédite, mais elle va lui permettre d'ouvrir la voie à la résolution du problème de la perception visuelle posé quelques années auparavant par Kepler.

²⁸⁰ Ibid. p. 95.

²⁸¹ Ibid.

²⁸² Ibid. p. 94.

D'après Kepler, la rétine possède elle-même la faculté de reconnaître l'image optique, c'est-à-dire de transformer le visible en du vu. Or pour Descartes la vision ne s'explique pas par la duplication spirituelle d'un objet mais par la capacité de l'âme à reconnaître les qualités de cet objet. Dans un chapitre entièrement consacré à l'étude du fonctionnement des sens, Descartes écrit ceci :

Il faut que nous remarquions qu'il est seulement question de savoir comment elles [les images] peuvent donner moyen à l'âme de sentir toutes les diverses qualités des objets auxquelles elles se rapportent, et non point comment elles ont en soi leur ressemblance²⁸³.

En outre, ce n'est pas le corps lui-même qui possède la faculté de sentir (ici en l'occurrence, la rétine), mais l'âme :

Mais il faut que je vous dise maintenant quelque chose de la Nature des sens en général, afin de pouvoir d'autant plus aisément expliquer en particulier celui de la vue. On sait déjà assez que c'est l'âme qui sent, et non le corps (...). Et on sait que ce n'est pas proprement en tant qu'elle dans les membres qui servent d'organes aux sens extérieurs, qu'elle sent, mais en tant qu'elle est dans le cerveau²⁸⁴.

Tout le problème consiste à comprendre comment l'âme peut avoir accès à l'information visuelle sans qu'une image parfaitement intelligible (décodée par la rétine pourrions-nous dire) ne parvienne jusqu'à elle. Descartes suggère que c'est par les nerfs que se transmet cette information :

Enfin, on sait que c'est par l'entremise des nerfs, que les impressions que font les objets dans les membres extérieurs, parviennent jusqu'à l'âme dans le cerveau²⁸⁵.

Le fait que la transmission de l'information sensorielle se fasse par l'intermédiaire des nerfs et que le *stimulus* de la vue soit identifié à la lumière signifie forcément que la lumière a un effet particulier sur les nerfs optiques, ce que Descartes démontre au sixième chapitre de la *Dioptrique*. En fait, les nerfs sont constitués de « petits filets » qui réagissent de façon spécifique à la « quantité de la lumière » qui les atteint :

²⁸³ Ibid. p. 102.

²⁸⁴ Ibid. p. 98. Descartes rejette l'idée que le corps puisse être le siège de la faculté sensorielle en arguant d'une part qu'il n'est pas nécessaire de contempler des objets pour sentir des effets semblables à ceux provoqués par la vision, et d'autre part, que certaines taches d'encre peuvent nous évoquer des objets familiers sans qu'une image de ceux-ci ne parvienne jusqu'au cerveau : « Comme vous voyez que les tailladouces n'étant faites que d'un peu d'encre posé ça et là sur du papier, nous représentent des forêts, des villes, des hommes, et même des batailles, et des tempêtes, bien que d'une infinité de diverses qualités qu'elles nous font concevoir en ces objets, il n'y en ait aucune que la figure seule, dont elles aient proprement la ressemblance ». Descartes R. *Dioptrique*, op. cit. p.101.

²⁸⁵ Ibid.

Mais il faut ici particulièrement considérer en quoi consiste **la quantité de la lumière** qui se voit, c'est-à-dire, la force dont est mu chacun des petits filets du nerf optique²⁸⁶.

En d'autres termes la sensation de la lumière et de la couleur dépend de la façon dont sont mus les petits filets du nerf optique. Et ce mouvement est lui-même dépendant de la quantité de lumière qui pénètre l'œil. Si la quantité de lumière est trop importante, alors le mouvement des petits filets devient violent, ce qui engendre une sensation de douleur (c'est le cas de l'éblouissement déjà évoqué par Alhazen). En outre, le propre de l'âme est d'être sensible à la « force » avec laquelle sont mus les petits filets des nerfs (et ce, quel que soit l'organe sensoriel auxquels ils appartiennent) :

Il faut penser que notre âme est de telle nature que la force des mouvements qui se trouvent dans les endroits du cerveau d'où viennent les petits filets des nerfs optiques lui fait avoir le sentiment de la lumière (...). Ainsi que les mouvements des nerfs qui répondent aux oreilles lui font ouïr les sons ; et ceux des nerfs de la langue, lui font goûter les saveurs ; et généralement, ceux des nerfs de tout le corps lui font sentir quelque chatouillement quant ils sont modérés, et quand ils sont trop violents, quelque douleur ; sans qu'il doive, en tout cela, y avoir aucune ressemblance entre les idées qu'elle conçoit et les mouvements qui causent ces idées²⁸⁷.

Ce qui est tout à fait nouveau dans la théorie cartésienne de la vision, c'est que le mouvement des petits filets du nerf optique peut être provoqué par autre chose que par la lumière, et produire pourtant sur l'âme un effet identique. Descartes poursuit :

Ce que vous croirez facilement si vous remarquez qu'il semble à ceux qui reçoivent quelque blessure dans l'œil qu'ils voient une infinité de feux et d'éclairs devant eux (...). En sorte que ce sentiment ne peut être attribué qu'à la seule force du coup, laquelle meut les petits filets du nerf optique, ainsi que le ferait une violente lumière²⁸⁸.

Si l'âme sent, c'est donc par l'entremise des nerfs, et d'eux seuls. Autrement dit, la transmission de l'information sensorielle est toujours purement nerveuse ce qui est bien différent de l'idée d'une transmission vers l'âme d'une image conservant la ressemblance de l'objet.

²⁸⁶ Descartes R. *Dioptrique*, op. cit. p. 119. Notons que pour l'expression « quantité de lumière » renvoie pour la première fois à « plus ou moins » de lumière. C'est nous qui soulignons.

²⁸⁷ Ibid. 117-118.

²⁸⁸ Ibid.

Descartes et la causalité en jeu dans la sensation

Comme nous disions précédemment, avec Descartes la cause de la vision est de nature différente de l'effet qu'elle produit : « Il n'y a aucune ressemblance entre les idées qu'elle [l'âme] conçoit et les mouvements qui causent ces idées » ; et le seul lien qui les unit est que l'existence de l'une détermine l'apparition de l'autre. Nous dirions aujourd'hui que la cause de la vision est physique et que l'effet est psychologique. Avec Descartes on entre donc dans une nouvelle conception de la causalité de la perception où la saisie consciente des objets dépend du sujet lui-même et non d'une sorte de dédoublement intérieur du processus de la vision :

Or, encore que cette peinture, en passant ainsi jusqu'au dedans de notre tête, retienne toujours quelque chose de la ressemblance des objets dont elle procède, il ne se faut point toutefois persuader que ce soit par le moyen de cette ressemblance qu'elle fasse que nous sentons, comme s'il y avait derechef d'autres yeux en notre cerveau avec lesquels nous puissions apercevoir. Mais plutôt, que ce sont les mouvements par lesquels elle est composée, qui, agissant directement contre notre âme, d'autant quelle est unie à notre corps, sont institués de la Nature pour nous faire avoir de tels sentiments²⁸⁹.

L'âme ne perçoit des choses que des signes, et non ce qu'elles sont par elles-mêmes. Une telle posture modifie radicalement la nature de la causalité en jeu jusqu'alors dans l'explication du mécanisme de la vision : l'effet psychique n'est plus semblable à sa cause physique, autrement dit la sensation de lumière n'est plus semblable à la lumière elle-même, mais au mouvement plus ou moins intense des « filets » des nerfs optiques provoqué par la quantité de lumière qui les atteint (à cette quantité est associée l'idée de « force » de la lumière : plus la quantité est importante, plus la force est grande). Cette interprétation est conduite par un raisonnement de type mécaniste où la causalité se fonde sur les notions de « force », de « contact » et de « mouvement ». Sur ce point, l'approche cartésienne de la causalité en jeu dans la sensation semble bien éloignée de celle que nous admettons aujourd'hui. Pour Maurice Merleau-Ponty, la *Dioptrique*, dans sa tentative d'expliquer la vision est même « un échec », puisqu'en réduisant l'action de la lumière à une action de contact, Descartes « nous débarrasse aussitôt de l'action à distance et de cette ubiquité qui fait toute la difficulté de la vision, et aussi toute sa vertu. »²⁹⁰

²⁸⁹ Voir à ce sujet, l'analyse proposée par Gérard Simon, *Archéologie de la vision*, op. cit. 234-241.

²⁹⁰ Merleau-Ponty M. *L'œil et l'esprit* (1935), Gallimard, Paris, 2004, p. 40.

Pourtant, même si le modèle mécaniste cartésien demeure insuffisant et réducteur, expliquer la vision non plus comme une métaphore des choses, mais comme la succession d'évènements que nous qualifierions aujourd'hui de physiques, physiologiques et psychologiques, permet à Descartes de rompre définitivement avec la causalité antique et médiévale de la sensation, de sorte « qu'il ne reste rien du monde onirique de l'analogie »²⁹¹. Avec Descartes, le « je » devient partie prenante de l'acte de voir, ce qui permet de penser la vision comme la réponse psychique à une stimulation physico-physiologique. Cette stimulation est directement liée à la quantité de lumière qui pénètre l'œil et à laquelle l'organe récepteur (la rétine) est physiologiquement sensible. Par conséquent, nous retiendrons que la notion de quantité de lumière est opérationnelle chez Descartes, même si l'explication mécaniste qu'il fournit s'écarte de l'explication énergétique actuelle alors même qu'elle en est, selon nous, la source. En effet, à partir du moment où la quantité de lumière détermine la réponse de l'organe de la sensation et par là-même la perception visuelle, il devient envisageable de mesurer cette quantité, et de relier cette mesure à celle de la sensation, en d'autres termes, d'établir un lien quantitatif entre un phénomène physique et un phénomène psychique. En 1712, Nicolas de Malebranche (1638-1715) confirmera cette idée en affirmant « qu'il ne faut qu'une quantité déterminée de lumière pour ébranler suffisamment la rétine et faire voir les objets »²⁹². Enfin, plus de deux siècles après Descartes, le physiologiste allemand Gustav Fechner (1801-1887) cherchera à établir la formule exacte de la relation entre l'intensité de la sensation (d'ordre psychique) et celle de l'excitation (d'ordre physique). Et même si la loi quantitative énoncée par Fechner se révèle imprécise, il n'en demeure pas moins qu'elle formalise selon nous un lien évoqué par Descartes dès le 17^e siècle.

Un autre point nous paraît essentiel : à partir de Descartes, la vision ne s'explique plus par le cheminement jusqu'au cerveau d'une image semblable à l'objet. En particulier, la perception de la couleur est, dans la théorie cartésienne de la vision, une réponse à un certain type de mouvement de la lumière, qui, même s'il est de type mécanique, devient extérieur à l'objet. Avec Descartes, la couleur ne dépend plus de l'objet lui-même, mais devient extérieure à lui, ce qui se révélera fondamental dans les progrès ultérieurs des théories de la perception

²⁹¹ Merleau-Ponty M. *L'œil et la vision*, op. cit. p. 41.

²⁹² Malebranche N. (de), *Eclaircissements sur la vision* (1712), *Œuvres Complètes*, Vrin, Paris, 1984.

visuelle et de façon plus générale, dans les progrès ultérieurs de l'optique. A partir de Descartes, en effet, la lumière, pensée indépendamment des qualités de l'objet et de la sensation, devient un objet d'étude à part entière dont la nature mérite d'être explicitée. Par la rupture épistémologique qu'il opère en modifiant la causalité en jeu dans le mécanisme de la vision, Descartes ouvre la voie à une recherche novatrice sur la nature de la lumière dont Francesco Grimaldi (1618-1663) puis Issac Newton (1642-1727) seront les protagonistes.

Le mécanisme cartésien de la vision s'inscrit bien dans la marche rationnelle du progrès des théories de la vision. La définition de la lumière adoptée par l'Académie Royale des Sciences en 1781 que nous citons au début de cette partie officialise en quelque sorte la pensée de Descartes. Rappelons-là pour mémoire :

Lumière : Fluide très délié, qui en affectant notre oeil de cette impression vive que l'on nomme clarté, rend les objets visibles. Ce fluide réside, comme intermède, entre l'objet visible et l'organe qui en reçoit l'impression et il occupe, par lui-même et par son action l'intervalle qui les sépare. Ce qui rend la clarté, ce qui rend les objets visibles est donc une matière, dont l'action peut être plus ou moins forte suivant les circonstances²⁹³.

Dans cette définition, la vue est dépendante de l'action « plus ou moins » forte de la lumière. En d'autres termes, la sensation dépend de l'intensité lumineuse si tant est que l'on considère l'intensité comme « le degré de la force », ce qui est le cas dès 1760²⁹⁴. Malgré cette remarquable avancée, il subsiste dans la *Dioptrique* une idée qui continue de nous surprendre. Cette idée concerne la vision nocturne des chats sur laquelle nous souhaitons nous arrêter quelques instants.

Descartes et la vision nocturne des chats

Pour Descartes, en effet, les chats, à la différence des hommes, émettent leur propre lumière, ce qui explique qu'ils voient la nuit :

Ainsi faut-il avouer que les objets de la vue peuvent être sentis, non seulement par le moyen de l'action qui, étant en eux tend vers les yeux ; mais aussi par le moyen de celle, qui étant dans les yeux, tend vers eux. Toutefois, pour ce que cette action n'est autre chose que la lumière, il faut remarquer qu'il n'y a que ceux qui peuvent voir la nuit, comme les chats, dans les yeux desquels elle se trouve²⁹⁵.

²⁹³ *Dictionnaire raisonné de physique* (1781) de l'Académie Royale des Sciences (Paris).

²⁹⁴ Voir à ce sujet le *Dictionnaire historique de la langue française*, sous la direction d'Alain Rey, Le Robert, 1998.

²⁹⁵ Descartes R. *Dioptrique*, op. cit. p. 75.

Cette idée a de quoi nous surprendre. Pourtant, elle est également présente chez Kepler qui de manière analogue écrit dans les *Paralipomènes* que « des sources permanentes de lumière sont dans les yeux des chats »²⁹⁶. Or s'il est exact que non seulement les chats sont nyctalopes, mais également que leurs yeux brillent dans la nuit, cela ne signifie pas pour autant qu'ils émettent leur propre lumière. Ceci avait d'ailleurs été parfaitement expliqué par Léonard de Vinci quelques siècles auparavant :

Si l'œil du chat brille dans la nuit, ce n'est pas dû à une émission quelconque de l'œil de l'animal, mais à la réflexion de la lumière sur la cornée²⁹⁷.

On peut légitimement s'étonner du fait que ni Kepler ni Descartes, pourtant acquis à la cause intromissioniste, n'expliquent la vision nocturne du chat de façon satisfaisante. Ceci témoigne d'une difficulté dont il faudra sans doute tenir compte dans l'utilisation didactique que nous ferons de l'histoire des théories de la vision.

2.6. En conclusion

C'est sur cette controverse à propos de la vision nocturne du chat que s'achève notre histoire du mécanisme optique de la vision. A partir de l'étude du cheminement rationnel de la pensée historique située entre le 5^e siècle avant J.C. et le 17^e siècle, nous avons cherché à montrer comment la lumière est devenue le *stimulus* de la vue. En particulier, nous avons souhaité faire ressortir les éléments qui ont favorisé l'émergence d'une explication du mécanisme de la vision rationnellement acceptable, du moins du point de vue du rôle joué par la lumière. Le mécanisme de la vision est un processus à la fois physique, physiologique et psychologique, et il aura fallu plus de vingt siècles pour que ces trois disciplines s'interpénètrent en une explication cohérente, sans que l'une ou l'autre ne soit privilégiée. Vingt siècles donc pour qu'à un traitement géométrique et presque métaphysique de la vision succède un traitement quantitatif où physique, physiologie et psychologie se retrouvent liées tout en s'arrogeant des champs d'étude bien spécifiques.

²⁹⁶ Kepler J. *Paralipomènes*, op. cit. chapitre V, p. 313.

²⁹⁷ Léonard de Vinci, Q.IV, folio 12.

A partir du moment où Descartes admet que la lumière est le *stimulus* de la vue, ce n'est pas seulement son interaction avec l'œil qu'il prend en compte, comme le faisaient Alhazen et Kepler avant lui, mais son interaction avec tout le système visuel. Mais avant cela, avant que la dimension physio-psychologique ne soit rationnellement intégrée à l'explication du mécanisme de la vision, il aura fallu tout le génie d'Alhazen pour parvenir à penser l'œil comme récepteur d'une entité provenant des objets et indépendante de ceux-ci. A partir du 11^e siècle, la vue ne procède plus d'un contact direct entre œil et objet (quel que soit le sens considéré, depuis ou vers l'œil), mais d'un contact entre l'œil et une entité intermédiaire diffusée par les objets éclairés : la lumière. Que l'interprétation géométrique et quasi physiologique proposée par Alhazen soit fausse, il n'en demeure pas moins que la vision s'explique désormais d'un point de vue physique par une entrée de lumière dans l'œil, ce qui constitue l'une des avancées conceptuelles de l'histoire des sciences les plus remarquables : la lumière (et donc la vision) devient géométrisable et quantifiable, et la science classique occidentale peut dès lors s'intéresser aux effets de la lumière sur les organes de la vision et sur la sensation visuelle, mais également à la nature de la lumière elle-même. Elle peut également mettre un terme à la controverse persistante du sens de la vue. C'est le cheminement rationnel qui conduit Alhazen à rompre avec les théories antiques de la vision dont nous souhaitons nous inspirer pour construire notre outil d'apprentissage. Rappelons que l'objectif de connaissance visé par cet outil est le suivant : « pour voir un objet, il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil ». Comme nous avons pu le voir tout au long de ce parcours historique, l'entrée de lumière dans l'œil est une condition certes nécessaire à la vue, mais non suffisante. Pourtant, nous faisons le choix de nous limiter à cette condition nécessaire. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous ne nous intéresserons pas au rôle du système visuel. Par conséquent, notre outil d'apprentissage intégrera les éléments historiques suivants :

- ✓ La vision est une passion ; comme tous les autres sens, elle est le résultat de l'action d'un agent extérieur sur un organe spécifique.
- ✓ Certaines parties de l'œil (notamment la pupille) se modifient en fonction de la quantité de lumière qui les atteint.
- ✓ La vue est affectée par une lumière trop forte.
- ✓ Les objets éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent dans toutes les directions.

TROISIEME PARTIE : L'enseignement du mécanisme optique de la vision, un apport de l'histoire des sciences

L'acquisition du mécanisme optique de la vision nécessite que l'élève rompe avec ses propres représentations et qu'il construise un modèle dans lequel la lumière devient le vecteur de l'information visuelle, une entité invisible qui relie l'objet regardé à l'œil de l'observateur. Or comme nous le rappellent Samuel Joshua et Jean-Jacques Dupin, le processus intellectuel qui conduit à l'élaboration d'un modèle requiert parfois un apport extérieur :

En général, un apport extérieur s'avère indispensable à une étape ou à une autre du processus [de modélisation], apport qui non seulement guide ou réoriente les élèves, mais modifie radicalement le cadre de leur réflexion. Il s'agit alors de faire passer sous la gestion des élèves des modélisations avancées par le professeur. Mais comme cette introduction répond à un questionnement qui a été longuement mûri, on peut espérer ancrer plus aisément ce nouveau modèle dans un espace de sens pour les élèves²⁹⁸.

Dans le cas qui nous occupe, l'histoire des sciences va être utilisée comme apport extérieur. Une exposition explicite de la démarche d'Alhazen devrait permettre à l'élève de s'approprier un modèle de la vision rationnellement acceptable. L'objet de cette partie est de définir et d'évaluer une modalité d'utilisation de l'histoire des théories de la vision qui puisse favoriser cette appropriation.

1. Enseignement assisté par l'histoire des sciences : quels supports, pour quel enseignement ?

Appliquée à l'enseignement du mécanisme optique de la vision, cette question n'a pas de réponse immédiate, et les voies à explorer sont nombreuses : utilisation d'un ou de plusieurs textes historiques, récit oral ou écrit d'une découverte, étude documentaire etc. Quelle que soit la modalité choisie, il nous paraît important qu'elle s'inscrive dans une séquence

²⁹⁸ Joshua S. et Dupin J.J. *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques* (1993), PUF, 2003, p. 337.

favorisant l'activité de recherche dans une perspective constructiviste²⁹⁹. Autrement dit, une séquence dans laquelle l'élève soit mis en situation de construire de nouvelles connaissances, et qui tienne compte de celles qu'il possède déjà. Or, l'apprentissage des savoirs scolaires procède non seulement d'un acte intra-individuel et privé (le développement cognitif de l'élève dépend des interactions entre ses propres structures cognitives et les informations qui lui viennent de l'extérieur), mais aussi d'un acte collectif et inter-personnel, comme l'ont montré les travaux des psychologues Willem Doise et Gabriel Mugny dans les années 1970³⁰⁰. Cette dimension sociale de l'apprentissage, connue sous le nom de socio-constructivisme, nous apparaît ici essentielle.

1.1. Pour une approche socio-constructiviste

L'idée fondamentale du socio-constructivisme est que les interactions sociales (échanges, débats entre pairs) sont un moteur du progrès cognitif :

A tout moment de son développement, des compétences spécifiques permettent à l'individu de participer à des interactions sociales relativement complexes qui peuvent donner lieu à de nouvelles compétences individuelles qui pourront s'enrichir de nouveau lors de participations à d'autres interactions sociales³⁰¹.

La rencontre entre pairs autour d'une tâche peut entraîner des progrès cognitifs individuels. Ainsi, les échanges inter-individuels peuvent-ils parfois conduire à certains progrès cognitifs lorsque l'élève est confronté à d'autres points de vue que le sien, c'est-à-dire, lorsqu'un

²⁹⁹ Le terme « constructivisme » est utilisé pour la première fois par Jean Piaget au début du 20^e siècle. Selon Piaget, « l'enfant contribue activement à la construction de sa personne et de son univers ». Autrement dit, l'activité de l'élève est un facteur décisif de l'apprentissage. De façon corrélatrice l'acquisition des connaissances dépend de la structure de pensée de l'enfant, de ce qu'il sait déjà. Cette prise en compte du « déjà-là » de l'enfant s'avère aujourd'hui fondamentale dans l'enseignement. Voir à ce sujet Piaget J. *De la pédagogie*, Odile Jacob, 1998. Signalons que les méthodes dites « constructivistes » sont inspirées des « méthodes actives » revendiquées dès la fin du 19^e siècle par le philosophe et pédagogue Henri Marion : autour de 1880, s'affirme chez plusieurs auteurs la nécessité de dépasser la tradition de l'enseignement, qualifiée d'empirique et de routinière, et de fonder la pédagogie sur la science. La psychologie devient alors la science toute désignée pour fonder rationnellement la pédagogie. Ces méthodes furent mises en pratique au début du 20^e siècle par Célestin Freinet.

³⁰⁰ Doise W et Mugny G. *Le développement social de l'intelligence*, Paris, Interéditions, 1981. Voir également Perret-Clermont A.N. *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale*, Peter Lang, Bern, 1979, Roux J.P. Médiations entre pairs et co-élaboration de savoirs en milieu scolaire, in *Education*, 9, 1996, 20-22.

³⁰¹ Doise W. *Logiques sociales dans le raisonnement*, Delachaux et Niestlé, Neufchâtel, 1993, p. 126. Cette idée est inspirée des travaux de Lev Vygotsky pour qui les fonctions psychiques supérieures (attention, mémoire, pensée verbale etc.) sont directement issues des rapports sociaux par « transformation de processus interpersonnel en processus intrapersonnels », Vygotsky L. (1933), Le problème de l'enseignement et du développement mental à l'âge scolaire, in Shneuwly B. et Bronckart J.P. (eds), *Vygotsky aujourd'hui*, Delachaux et Niestlé, Paris, 1985, 95-117.

conflit socio-cognitif a lieu durant l'interaction. Ce conflit socio-cognitif se définit par l'hétérogénéité des opinions, des hypothèses ou des réponses des élèves à un même problème. L'efficacité du conflit vient d'une part de ce que la confrontation explicite des points de vue dans la rencontre inter-individuelle rend présentes différentes réponses possibles, et d'autre part, de ce que l'autre fournit, en plus de sa réponse, des indications sur un cheminement de pensée différent. Cette altérité ouvre des voies de résolution nouvelles, et offre à l'élève un cadre de réflexion inédit. Dans ce contexte, l'outil d'enseignement que nous souhaitons élaborer vise une modalité didactique que Joshua et Dupin appellent le « débat scientifique dans la classe » :

Il s'agit d'une référence au débat dans la communauté savante, mais ce n'est qu'une référence : il y a en réalité ici un processus de transposition didactique à l'œuvre concernant la méthode plus que les contenus ; c'est plus la forme du débat qui est transposée que son fond. En effet, ce dernier concerne la construction culturelle des connaissances dans la société savante, alors que sur le plan didactique, seule est concernée l'acquisition des connaissances déjà établies³⁰².

Les auteurs ajoutent que le débat proposé ne peut être que la conséquence d'une construction artificielle générée par un cadre pédagogique dans lequel la discussion apparaît comme libérée. Le « débat scientifique dans la classe » est créé en référence au « débat dans la communauté savante », c'est-à-dire à ce qu'il est convenu d'appeler une controverse scientifique.

1.2. Intérêt cognitif de l'utilisation d'une controverse scientifique

Du point de vue du contenu, les controverses scientifiques portent sur des énoncés qui visent la production de connaissances durables sur le monde. Selon la définition du sociologue Dominique Raynaud :

Une controverse scientifique est un débat organisé qui se donne pour but des valeurs de connaissance (...) Elle se caractérise par la division persistante et publique de plusieurs

³⁰² Joshua S. et Dupin J.J. *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, op. cit. p. 336. L'expression « transposition didactique » renvoie aux travaux d'Yves Chevallard. Les mécanismes généraux permettant le passage d'un objet de savoir à un objet d'enseignement sont regroupés sous le nom de transposition didactique. Cette transposition n'est pas un acte de simplification d'objets complexes, mais un acte de contextualisation, et l'objet d'enseignement est intrinsèquement différent de l'objet de savoir qui lui sert de référence puisque son environnement épistémologique est lui-même différent. Voir à ce sujet Chevallard Y. *La transposition didactique* (1985), *La pensée sauvage*, 1992.

membres d'une communauté scientifique, coalisés ou non, qui soutiennent des arguments contradictoires dans l'interprétation d'un phénomène donné³⁰³.

Nombreux sont les sujets qui, dans l'histoire des sciences, ont fait l'objet de débats. Ceux-ci s'inscrivent en général dans la durée (entre plusieurs années et plusieurs siècles), et ne s'achèvent que par ce que Raynaud appelle un « règlement ». Ce règlement inclut la résolution du problème posé (elle suppose la plupart du temps la découverte d'une solution rationnelle), mais également l'accord des parties³⁰⁴.

La controverse scientifique en tant que support d'enseignement nous intéresse pour deux raisons. D'abord parce qu'elle est le lieu d'un débat dont la transposition en classe pourrait s'avérer efficace d'un point de vue socio-cognitif ; ensuite, parce que le règlement par lequel elle s'achève pourrait inspirer une stratégie didactique particulière et constituer l'apport extérieur que nous évoquions précédemment.

Dans la situation analysée ici, le débat scientifique dans la classe se construit en référence à la controverse historique. Il s'agit par conséquent de choisir un problème qui, ayant donné lieu à une polémique dans l'histoire des sciences, donne lieu pareillement à un débat au sein de la classe³⁰⁵. Dans le cas particulier de l'enseignement de l'optique, la pertinence d'une telle transposition va donc se trouver suspendue à la connaissance que nous avons des raisonnements des élèves à propos de la vision, et de leur ressemblance éventuelle avec des idées déjà présentes dans l'histoire.

³⁰³ Raynaud D. *La sociologie des controverses scientifiques*, PUF, Paris, 2003, 1-8.

³⁰⁴ Pour une étude détaillée des controverses scientifiques, voir Raynaud D. *La sociologie des controverses*, ibid.

³⁰⁵ On trouvera l'analyse d'une séquence d'enseignement construite à partir d'une controverse historique dans les travaux de Jérôme Viard. Voir Viard J. Peut-on ignorer la cause du rebond ? Une question historique toujours d'actualité, in Viennot L. et Debru C. *Enquête sur le concept de causalité*, PUF, Paris 2003, 31-55.

2. Idées des élèves à propos de la vision et théories antiques de la vision : similitudes ?

A la lecture des deux parties précédentes, on peut être frappé par les similitudes entre les idées des élèves et celles des penseurs de la Grèce antique. Il pourrait donc être tentant de rapprocher ces idées afin d'analyser les raisonnements des élèves grâce à ceux des anciens. Cela signifie que l'on pourrait interpréter la pensée pré-scientifique individuelle simplement en regardant d'un peu plus près les prémices de la pensée historique. Poussée à la limite, une telle approche tendrait à confondre les origines de l'histoire des sciences et celles de la psychogénèse, Hipparque et un enfant de maternelle, Platon et un élève de 12 ans³⁰⁶. Or, il ne s'agit pas de réduire le statut cognitif des penseurs de l'Antiquité à celui des élèves. Nous ne nions pas le fait que certaines idées se ressemblent, ou en tout cas qu'il existe, comme nous le verrons plus avant, certains traits de raisonnement communs à la pensée historique et individuelle. Mais comme nous l'avons montré en introduction, d'une part de telles ressemblances sont souvent discutables au vu notamment des différences de contextes dans lesquelles elles se construisent, et d'autre part il convient d'être prudent quant à l'utilisation didactique d'une mise en perspective historico-psychogénétique³⁰⁷. Par conséquent, notre objectif n'est ni d'utiliser les idées des anciens pour interpréter celles des élèves et des enfants, ni de mettre en avant certaines ressemblances qui par la suite ne nous seraient d'aucune utilité.

A titre d'exemple, nous pourrions rapprocher certaines idées d'élèves extramissionnistes de celles d'Hipparque dans lesquelles la vue est considérée comme une sorte de toucher, comme une entité dotée de propriétés tactiles. D'une façon analogue, on pourrait penser que les raisonnements intromissionnistes naïfs présentent quelques similitudes avec les théories

³⁰⁶ On peut rappeler à ce sujet la mise en garde du psychologue Henri Wallon que nous citons en introduction : « Entre l'enfant et le primitif, la distinction est nette. L'un est en présence de techniques qu'il ne sait pas encore utiliser ; pour l'autre, elles font défaut. La comparaison entre l'enfant et le primitif est sans doute utile, non pas qu'elle nous fasse retrouver chez l'enfant un stade du passé, mais parce qu'elle nous permet de démêler la part qui revient, dans l'exercice de la pensée, aux instruments et aux techniques de l'intelligence. **Ainsi, serons-nous gardés contre le risque de tenir un enfant de 12 ans pour plus intelligent que Platon ou du moins qu'un primitif éminent dans son clan, et de confondre le niveau de la logique avec la puissance de la pensée.** », *L'Evolution psychologique de l'enfant*, 1941, Colin rééd. 2002, p. 34. C'est nous qui soulignons.

³⁰⁷ Voir introduction .

atomistes de l'Antiquité. Mais la recherche de telles analogies n'est pas l'objet de notre travail. Non pas que nous ne souhaitions pas nous y intéresser (nous avons d'ailleurs montré en deuxième partie que l'attention portée à certains raisonnements d'enfants permettait de considérer les théories antiques de la vision sous un jour nouveau³⁰⁸), mais la raison pour laquelle nous faisons appel à l'histoire des théories de la vision n'est pas à proprement parler la mise en évidence fine d'analogies idée pour idée. C'est pourquoi les enquêtes que nous avons présentées en première partie ne sont pas suffisantes pour affirmer que « la vision » qui sort des yeux des enfants est comparable à « la main tendue » d'Hipparque ou au *pneuma* des stoïciens, ou que « les petites particules » de Thibaud ressemblent « aux atomes » de Leucippe, ou encore que les « images » envoyées par les objets dans les idées intromissionnistes naïves sont semblables aux « simulacres » de Lucrèce. Dans le détail des idées développées de part et d'autre, de tels rapprochements nous paraissent périlleux et mériteraient une étude spécifique.

En revanche, en ayant une vision plus globale des raisonnements, sans entrer dans le détail des idées ou des mécanismes de pensée, il nous semble utile de dégager de grandes tendances communes aux élèves et aux penseurs antiques et médiévaux. Nous pourrions ainsi employer l'histoire des théories de la vision pour proposer un cheminement de pensée à des élèves dont les raisonnements avant enseignement présenteraient certains traits communs avec ceux des anciens. Le premier trait auquel nous allons nous intéresser concerne le « sens » de la vue.

2.1. Analogies autour du « sens » de la vue

Les études de raisonnements que nous avons présentées plus haut montrent que les élèves et les enfants expliquent la vision soit dans un sens œil→objet, soit dans un sens objet→œil (même s'il est vrai que la plupart des élèves interrogés privilégient le sens œil→objet). Et il nous paraît possible de rapprocher ces idées des théories extra et intro-missionnistes grecques et médiévales, à condition, bien entendu, de les considérer uniquement pour ce qu'elles disent

³⁰⁸ Voir deuxième partie. Nous avons d'ores et déjà entamé une réflexion sur la comparaison entre les idées des anciens et celles des élèves à propos de la vision. Voir en particulier, Hosson (de) C. et Kaminski W. Les yeux des enfants sont-ils des « porte-lumière » ? op. cit. Cette réflexion se poursuivra lors de travaux ultérieurs.

à propos du « sens » de la vue, vers ou depuis l'œil. Un tel rapprochement va se révéler fondamental pour la suite de notre recherche.

2.2. Extramission, intromission : expliquer la vision sans l'aide d'une lumière *stimulus* de la vue

L'optique de l'Antiquité a ceci de commun avec l'optique pré-scientifique qu'elle se pratique autour d'une idée de « lumière » très particulière, et qui n'a rien de commun avec ce qu'en dit la physique d'aujourd'hui. Ce sont des optiques « sciences de la vision » où le rôle de la lumière se limite à éclairer les objets ou à rendre opérant le regard. Quel que soit le sens adopté pour expliquer la vision (vers ou depuis l'œil), lorsqu'il est question de « quelque chose » qui sort ou qui entre dans l'œil, celui-ci n'est pratiquement jamais de la lumière, en tout cas au sens de ce qui est émis par les sources primaires. Et ce qui est symptomatique, c'est que dans les deux cas, ce « quelque chose » fait l'objet de dénominations diverses.

Dans les explications intromissionnistes des élèves de quatrième, le « quelque chose » qui est envoyé par l'objet est désigné par les termes « image », « reflet », ou même par le nom de l'objet lui-même. De la même façon, les enfants emploient dans une apparente indifférence toute sorte de termes afin de qualifier ce qui sort de l'œil « le regard », la « vue », des « rayons de 'voit' », un « truc », etc. L'important est de retenir que ces termes ne désignent jamais la lumière au sens de ce qui est émis par les sources primaires.

Nous retrouvons une terminologie tout aussi polymorphe dans les raisonnements des protagonistes de l'optique de l'Antiquité. C'est sans doute ce qui pousse Vasco Ronchi à utiliser le terme *quid* afin de désigner ce qui sort de l'œil tant dans les théories pythagoriciennes que platoniciennes. Le *quid* se substitue tantôt au « feu » de Platon, tantôt au « rayon visuel » d'Euclide... mais conforte l'œil dans son rôle actif. En fait, peu importe la nature respective du « quelque chose » ou du *quid*, l'essentiel est de constater qu'il existe, de part et d'autre, une foison de labels et que ces labels sont tous équivalents sur un point : ils ne désignent pas la lumière au sens où la physique la définit aujourd'hui, mais plutôt l'activité visuelle de l'œil associée parfois à celle de l'âme ou à celle du système visuel dans son ensemble. En fait, que ce soit chez les penseurs antiques et médiévaux ou chez les élèves actuels, les explications du mécanisme de la vision s'inscrivent dans un champ interdisciplinaire où le psychologique domine. C'est pourquoi, dans une certaine mesure, il

nous semble légitime de rapprocher l'idée d'une émission depuis l'œil, lorsqu'elle est évoquée par les élèves, de celle des pythagoriciens ou des stoïciens : dans les deux cas, cette émission n'est pas de la lumière, elle témoigne de l'activité de l'œil, et fait l'objet de dénominations diverses. Cette idée va plus loin que le rapprochement évoqué par Edith Guesne dans sa recherche concernant les conceptions des enfants sur la lumière :

Pour les enfants, le mouvement allant des yeux à l'objet reste abstrait ; il se différencie ainsi nettement du 'feu visuel' des anciennes théories (...) Seule l'idée que le sujet est à l'origine du processus, au lieu d'en être le récepteur, est commune à ces représentations de la vision³⁰⁹.

Or « l'idée que le sujet est à l'origine du processus » n'est pas l'unique trait d'union entre les représentations des penseurs antiques et celles des enfants extramissionnistes. Dans les deux cas, le « quelque chose » émis par l'œil n'est pas de la lumière, et dans les deux cas, les termes pour le qualifier sont nombreux.

Le concept construit de lumière, tel que la physique le définit aujourd'hui, n'est pas opérationnel dans les raisonnements spontanés des élèves pas plus qu'il ne l'est dans les théories antiques de la vision. Si l'on considère les méandres laborieux que le concept de lumière rencontre au cours de son élaboration et dont l'histoire des sciences est témoin (voir deuxième partie), on peut s'attendre à ce qu'il peine à devenir opérationnel chez les élèves, même après enseignement³¹⁰. Aussi, les rapprochements que nous venons d'évoquer nous permettent de mesurer l'ampleur des difficultés liées à l'enseignement de certains concepts, celui de lumière notamment³¹¹. Ils nous permettent également de penser qu'il doit être possible de proposer à des élèves les éléments ayant permis l'émergence des théories rationnelles de la vision, puisqu'au départ, certaines idées présentent, dans les grandes lignes, quelques similitudes : elles expliquent la vision soit dans un sens œil→objet, soit dans un sens

³⁰⁹ Guesne E. Les conceptions des enfants sur la lumière, op. cit.

³¹⁰ Poussée par la curiosité, nous avons proposé notre questionnaire (Figure 18) à 75 professeurs des écoles stagiaires, c'est-à-dire à des adultes ayant déjà reçu un enseignement d'optique. Pour 21 d'entre eux l'œil envoie une « vision, la vue ou un regard » alors que pour 17 stagiaires la fleur envoie son « image », sa « forme » ou sa « couleur ». En revanche 37 (soit la moitié des stagiaires interrogés) disent que la fleur envoie de la lumière dans l'œil de la petite fille. Les résultats de cette petite enquête nous montrent qu'il existe, y compris chez les adultes, une tendance extramissionniste dans laquelle la vision est expliquée par quelque chose qui sort de l'œil.

³¹¹ Voir Saltiel E. et Viennot L., What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of student's ? op. cit.

objet → œil, et elles ne font jamais de la *lumière* un *stimulus* de la vue³¹². Expliquer le mécanisme de la vision dans sa version physique est difficile, l'histoire en est témoin, et il ne suffit pas de « corriger la représentation selon laquelle l'œil émet de la lumière »³¹³ pour aider les élèves à accepter que pour voir un objet, il est nécessaire que de la lumière issue de cet objet entre dans l'œil³¹⁴.

Si l'on généralise les résultats de notre enquête à l'ensemble de la population scolaire n'ayant jamais reçu d'enseignement d'optique, et que l'on considère que les élèves expliquent la vision soit dans le sens œil → objet, soit dans le sens objet → œil, alors on peut s'attendre à ce que les élèves d'une même classe s'affrontent sur le sens de la vue, et qu'ils reproduisent ainsi la controverse historique. En leur proposant un cheminement de pensée proche de celui qui conduisit au règlement de cette controverse, nous espérons les aider à trouver une explication rationnelle du mécanisme optique de la vision³¹⁵. Il s'agit en fait de transposer les éléments du règlement d'une controverse historique à une controverse de classe, étant entendu que du point de vue du « sens », ces controverses coïncident. Nous allons maintenant chercher une forme qui convient à l'exposition d'un tel cheminement et qui s'inscrit dans une démarche d'enseignement socio-constructiviste.

3. La forme dialoguée et le débat d'idées : une expression pédagogique ancienne

L'utilisation de la forme littéraire dialoguée à des fins pédagogiques est omniprésente dans l'histoire des idées et dans celle plus particulière des sciences. Au 5^e siècle avant J.C. les dialogues platoniciens (appelés également *dialogues socratiques*) apparaissent comme une

³¹² Nous sommes toutefois parfaitement consciente du fait que dans un cas (celui de l'optique de l'Antiquité), la lumière (au sens où la physique la définit aujourd'hui) fait défaut, dans l'autre (celui de l'optique pré-scientifique), elle existe mais les enfants ne savent pas l'utiliser.

³¹³ Programmes officiels de physique-chimie des classes de 5^e et 4^e, op. cit. p.31.

³¹⁴ Là encore, la formulation des programmes nous semble insuffisante, puisqu'il est attendu des élèves qu'ils sachent que « pour voir il faut recevoir de la lumière ». Dans cette phrase, ni l'œil, ni l'objet ne sont évoqués, autrement dit, la lumière n'est pas considérée, dans la vision, comme l'agent intermédiaire entre l'œil et l'objet.

³¹⁵ Nous prenons là encore le terme « règlement » tel que Dominique Raynaud le définit, c'est-à-dire comme la résolution d'une controverse incluant l'accord des parties. Voir Raynaud D. *Sociologie des controverses scientifiques*, op. cit. p. 19. Ce dernier point est important. Si Alhazen résout la controverse du sens de la vue, cette résolution n'aboutit pas à l'époque à un accord entre les tenants des théories intro et extra-missionistes.

transposition littéraire des exigences philosophiques de la rhétorique définie par Platon dans le *Gorgias* et le *Phèdre*. L'art oratoire doit servir ce que Platon appelle la *psychagogie*, c'est-à-dire la formation des esprits. Celle-ci a pour procédé la dialectique et pour but, la recherche de la vérité. Et c'est par la méthode dite de la *maïeutique* (celle de l'accouchement) que le fondateur de l'Académie, par la voie de Socrate, amène ses disciples sur le chemin de la connaissance :

Quant à mon art d'accoucher il a par ailleurs toutes les mêmes propriétés que celui des sages-femmes, mais il en diffère en ce que ce sont des hommes et non des femmes qu'il accouche ; en ce que, en outre, c'est sur l'enfantement de leurs âmes, et non de leurs corps, que porte son examen. D'un autre côté, ce qu'il y a dans mon art à moi de plus important, c'est d'être capable de faire sur la pensée d'un jeune homme, de toutes les manières possibles, l'épreuve de ce qu'elle enfante, et de voir si c'est un simulacre et une illusion ou bien quelque chose de viable et de vrai. (...) Chez moi il n'y a point d'enfantement de savoir, et le reproche que m'ont déjà fait bien des gens, de poser des questions aux autres et de ne rien produire moi-même sur aucun sujet faute de posséder aucun savoir, est un reproche bien fondé. (...) Ceux qui me fréquentent (...) n'ont jamais rien appris de moi, mais c'est de leur propre fond qu'ils ont, personnellement, fait nombre de belles découvertes, par eux-mêmes enfantées³¹⁶.

Le dialogue socratique permet un enseignement qui favorise chez le disciple la recherche et la découverte à partir de ses propres connaissances, de son « propre fond ». Cette méthode n'est pas sans rappeler les principes sur lesquels se fonde l'enseignement constructiviste. Plus de vingt siècles plus tard, lorsque Galilée rédige son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*³¹⁷, il reprend la structure fondatrice de la forme dialoguée socratique afin de mettre en scène la science de son temps.

Lorsque Galilée rédige son *Dialogue*, les autorités ecclésiastiques exigent de lui qu'il exprime des opinions opposées sans prendre parti pour Copernic. Officiellement, il ne s'agit que de présenter les deux systèmes du monde avec leurs arguments respectifs. Dans un chapitre de présentation du *Dialogue*, François de Gandt et René Fréreau proposent l'analyse suivante :

Le texte est un dialogue où divers points de vue apparaissent, où l'on rappelle de temps à autre qu'il n'est pas question de décider absolument en faveur de Copernic. En réalité, les professions de foi et les protestations de neutralité sont tout à fait formelles et superficielles, mal reliées au reste de l'argumentation. S'il y a dialogue, c'est un dialogue socratique où la vérité se fait jour dans la confrontation des opinions. Galilée a transformé le parallèle des hypothèses en un merveilleux artifice littéraire et pédagogique³¹⁸.

³¹⁶. Platon, *Théétète*, 148, trad. L. Robin, *Œuvres complètes*, tome 2, La Pléiade, 1950.

³¹⁷ Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), trad. R. Fréreau, Seuil, 1992.

³¹⁸ De Gandt F. et Fréreau R. Présentation du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), op. cit. p. 3

Galilée s'inspire donc de la méthode platonicienne, qui accomplit l'accouchement des esprits par le dialogue : le savoir ne peut se transmettre, mais doit être éveillé en chacun par un jeu de questions ou d'expériences de pensée. Et ce qui est remarquable, c'est qu'il parvient à mettre en forme un discours conceptuel tout en utilisant un langage expressif proche de celui d'une conversation ordinaire entre « honnêtes gens », comme le souligne Alexandre Koyré :

C'est l'honnête homme que Galilée veut gagner à sa cause ; or, l'honnête homme, il faut le persuader et le convaincre : il ne faut pas le fatiguer et l'accabler. De là, en partie, la forme dialoguée de l'œuvre, le ton léger de la conversation ; les digressions et les reprises constantes, le désordre apparent du débat : c'est bien ainsi qu'on conversait et discutait, en honnêtes gens, dans les salons des patriciens de Venise, ou à la Cour des Médicis³¹⁹.

Outre ses vertus esthétiques, le *Dialogue* se distingue également par la qualité de la construction du discours scientifique. Le *Dialogue* met en scène une conversation entre trois personnages. L'un des interlocuteurs, Simplicio, est chargé de présenter les objections traditionnelles à l'héliocentrisme, celles de l'opinion commune placée sous l'autorité d'Aristote. Le second, Sagredo, joue le rôle de l'honnête homme cultivé, prêt à admettre les idées nouvelles ; enfin Salviati tient la place de Galilée lui-même. Or, les modalités pédagogiques et littéraires sont telles qu'elles poussent le lecteur à s'identifier non avec la figure même de Galilée par la voix de Salviati, mais avec celle de la pensée aristotélicienne. Celui-ci est ensuite amené à récuser l'opinion commune et à lui substituer des idées novatrices par la réalisation de ce que Feyerabend qualifie de « saut formidable de l'imagination » :

Pas à pas, Simplicio est forcé d'admettre qu'un corps en mouvement, sans frottement sur une sphère concentrique par rapport au centre de la Terre, sera doué d'un mouvement 'infini', un mouvement 'perpétuel' (...) C'est une nouvelle idée, hardie, impliquant un saut formidable de l'imagination³²⁰.

Dans les années 1660, le chimiste Robert Boyle confirme l'intérêt pédagogique de l'échange dialogué pour l'établissement des connaissances scientifiques³²¹. Pour Boyle, l'acquisition d'une connaissance peut résulter de la mise en scène d'une controverse, à conditions que

³¹⁹ Koyré A. *Etudes galiléennes*, Hermann, 1966.

³²⁰ Feyerabend P. *Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance* (1975), trad. B. Jurdant, Seuil, 1979.

³²¹ Pour une étude de l'utilisation de la forme dialoguée chez Boyle, voir Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, trad. T. Piélat, La Découverte, 1993, 73-78. L'annexe 1 présente la controverse historique autour de l'existence du vide dont Boyle fut l'un des protagonistes.

celle-ci obéisse à certaines règles d'exposition. L'opinion de chacun se doit notamment d'être prise en compte dans la discussion, et ce, quelle que soit sa conformité avec le savoir visé ou établi :

Aussi fausses soient les opinions [des praticiens], les expériences étant justes, rien ne m'oblige à croire aux premières et je suis libre de tirer profit des secondes³²².

Boyle définit ainsi les principes qui doivent régir, selon lui, l'usage des querelles entre philosophes, et les met en œuvre dans *The Sceptical Chymist*. Cet ouvrage de 1661 est une sorte de « théâtre de la persuasion » qui voit s'affronter des contradicteurs (un aristotélicien, deux hermétistes et un représentant de Boyle lui-même) autour de la théorie des quatre éléments et du phlogistique. Les opinions de chacun sont discutées, réfutées, et la vérité n'est jamais inculquée. Une controverse est donc scénarisée et construite de telle sorte que le *consensus*, fruit de la contribution de chacun, émerge de la conversation elle-même.

Au 18^e siècle, le dialogue devient la forme d'expression privilégiée des philosophes des Lumières qui cherchent par cette voie à guider le lecteur vers le bon usage de sa raison³²³. Il s'agit de présenter une démarche de réflexion réelle, véritable pensée en action, tout en séduisant le lecteur. L'essentiel du dialogue philosophique repose sur la mise en scène des paroles des voix qui se répondent. Cette forme permet d'éviter la lourdeur du traité tout en profitant de l'attrait de la rapidité de l'argumentation, du jeu, de la distance ironique et de la double énonciation.

4. L'utilisation d'une controverse sous la forme dialoguée : un exemple en mécanique

Afin de juger de l'efficacité pédagogique et didactique de la forme dialoguée, nous avons élaboré une séquence d'enseignement à partir du *Dialogue* de Galilée dont l'objectif est de guider les élèves vers une première approche du principe d'inertie. La démarche intellectuelle de Salviati constitue l'apport extérieur qui doit permettre la réalisation du saut conceptuel

³²² Robert Boyle, cité par Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, op. cit. p. 72.

³²³ Les *Entretiens sur la pluralité des mondes* de Fontenelle est un exemple éloquent de l'utilisation pédagogique de cette forme littéraire particulière au 18^e siècle.

nécessaire à la construction d'une nouvelle idée du mouvement. Cette séquence ainsi que l'analyse de sa réalisation en classe sont présentées en annexe 2.

Notre séquence est construite autour d'extraits du *Dialogue* de Galilée et s'appuie sur un scénario qui sert de guide d'enseignement³²⁴. Celui-ci a pour objectif de provoquer chez les élèves la mise en place de procédures cognitives spécifiques qu'il s'agit de caractériser. Pour chacune des étapes de la progression, nous nous attachons à examiner leurs réactions au regard de celles que nous nous attendons à trouver, de façon à juger de l'impact de notre action pédagogique et didactique. L'attention portée aux conceptions communes à propos du mouvement nous permet d'élaborer une séquence d'enseignement en référence à la controverse historique de la chute des graves. En soumettant aux élèves le problème de la chute d'une pierre lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement uniforme, nous faisons en sorte que s'instaure dans la classe une polémique semblable à celle mise en scène par Galilée. Celle-ci devient un lieu d'expression et d'argumentation où s'affrontent des opinions diverses et opposées, élargissant ainsi le cadre de réflexion de chaque élève. Par le jeu d'une confrontation des idées des élèves à celles des anciens, nous parvenons à valoriser la réponse (fausse ou exacte) de chacun.

Globalement, les résultats de notre analyse viennent valider les hypothèses que nous avons formulées à l'occasion de la présentation de la séquence. D'un point de vue cognitif, la stratégie qui vise à réorienter les prévisions des élèves fonctionne puisque la plupart d'entre eux admet que la pierre tombe au pied du mât, et non derrière celui-ci. Cela les conduit à construire une explication conforme à une première approche du principe d'inertie. Certains y parviennent de façon autonome, d'autres ont besoin d'une aide extérieure représentée par le cheminement dialectique proposé par Galilée dans son *Dialogue*. En outre, les élèves semblent majoritairement conscients du cheminement intellectuel qui les conduit à formuler leur version du principe d'inertie. La plupart d'entre eux est capable d'analyser les tâches accomplies, et les effets sous-jacents. Cet aspect, auquel les chercheurs en sciences de l'éducation ont donné le nom de « métacognition », est loin d'être négligeable puisque nous

³²⁴ Le Centre de Liaison entre les Enseignants et les Astronomes (CLEA) propose une séquence d'enseignement dans laquelle quelques extraits du *Dialogue* de Galilée sont utilisés. Ceux-ci diffèrent de ceux que nous avons sélectionnés, de même en est-il du scénario qui les accompagne. Voir *Fiches pédagogiques niveau lycée*, CLEA.

savons aujourd'hui que l'efficacité d'un enseignement dépend en partie de la capacité de l'élève à analyser l'impact de ses procédures d'apprentissage³²⁵. Or il semble que la situation d'apprentissage que nous avons élaborée ait favorisé une certaine autonomie ainsi qu'une capacité d'analyse pertinente.

5. Evaluation de l'impact pédagogique et didactique d'un outil d'enseignement élaboré à partir de l'histoire des théories de la vision

Notre réflexion nous a conduit à privilégier l'utilisation d'un support d'enseignement construit à partir d'une controverse scientifique présentée sous la forme d'un dialogue. L'attention portée aux raisonnements des élèves à propos de la vision montre qu'il existe deux tendances opposées que l'on peut rapprocher des courants extra et intro-missionnistes grecs et médiévaux. Notre support d'enseignement se voit donc élaboré en référence à la controverse historique autour du « sens » de la vue et au règlement proposé par Alhazen au 11^e siècle. Or s'il existe bien une polémique historique autour du « sens » de la vue, nous n'avons pas trouvé de dialogues mettant en scène cette controverse dans la littérature philosophique ou scientifique. Nous avons décidé d'écrire notre propre dialogue (voir plus loin Texte 1).

5.1. Présentation du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*

Il s'agit d'une conversation entre trois personnages qui débattent de la façon dont s'effectue la vision. C'est donc un texte essentiellement argumentatif. Les protagonistes de notre dialogue portent le même nom que ceux du *Dialogue* de Galilée, et remplissent une fonction à peu près identique.

³²⁵ On dit qu'il y a métacognition chaque fois que l'élève prend du recul par rapport à l'action qu'il effectue pour analyser cette dernière. Tous les pédagogues s'accordent aujourd'hui pour dire que la métacognition est un acte fondamental de l'apprentissage. Les pratiques métacognitives permettent à l'élève de se prendre en charge, d'évaluer l'impact de ses procédures d'apprentissage afin de les réajuster. Voir à ce sujet Meirieu P. *La Métacognition, une aide au travail des élèves*, ESF, 2001.

Salviati est le détenteur de l'autorité savante. Par le jeu d'une démarche essentiellement fondée sur l'évocation et l'expérience de pensée, il orchestre le débat. De même que dans le *Dialogue* il est la voix de Galilée, dans notre texte il est notre représentant. Salviati a une idée très précise du cheminement intellectuel qu'il souhaite faire suivre à ses interlocuteurs. Chaque question qu'il pose, chaque expérience de pensée qu'il suggère, marque l'entrée dans une nouvelle étape du raisonnement.

Simplicio est farouchement attaché aux idées extramissionnistes, il est celui dont les idées doivent évoluer. C'est un personnage bougon, coléreux et contestataire, qui fait même parfois preuve de mauvaise foi. Son rôle est de mettre Salviati en difficulté.

Sagredo quant à lui n'a pas d'opinion tranchée, il semble ouvert aux idées de Salviati tout en étant attentif aux arguments de Simplicio. Il joue le rôle d'un personnage curieux qui cherche à comprendre celui dont la pensée ne lui est pas familière tout en mettant son propre savoir à l'épreuve. La fonction de Sagredo est de valoriser les interventions de Salviati et de modérer l'agressivité de Simplicio. Ses interventions et ses questions sont des appuis pour Salviati, elles permettent au débat d'avancer.

Les personnages ont chacun une fonction bien déterminée dans le dialogue : Simplicio joue le rôle du contradicteur, Sagredo celui du médiateur, quant à Salviati il est le détenteur de l'autorité. Dans l'échange, Sagredo reste prudent. Son discours est sans cesse modéré par des expressions telles que « sans doute », « il semble que ». Simplicio, quant à lui, est beaucoup plus affirmatif et catégorique. En outre, il s'emporte facilement.

Nous avons essayé de construire un texte qui soit à la fois scientifique et littéraire, et qui respecte les règles oratoires édictées par Galilée et par Boyle : le discours prend les allures d'une conversation plutôt cordiale. Les opinions sont librement exprimées, et la conversation s'achève sur un *consensus* acquis grâce à la contribution de chacun.

Nous avons choisi d'écrire notre texte dans un style qui indique explicitement aux élèves que la conversation se déroule dans le passé. Cette modalité d'écriture est pour nous un moyen de signaler aux élèves que les idées dont il est question dans le texte ont réellement existé. Lorsqu'ils reconnaîtront leurs idées dans celles du texte, nous pourrons alors bénéficier des avantages pédagogiques du procédé d'identification. En outre, nous avons pris soin, dans la

mesure du possible, d'associer ses idées aux savants qui les représentent (dans le texte il est fait référence à Lucrèce, à Aristote et à Alhazen).

Notre dialogue est le fruit d'une réflexion multidimensionnelle. Il est le lieu de convergence des différentes investigations didactiques, pédagogiques et épistémologiques que nous avons présentées. En effet, il est adapté aux représentations des élèves (voir première partie), il s'appuie sur une analyse épistémologique et historique du mécanisme optique de la vision (voir deuxième partie), et enfin, il est construit sur un artifice littéraire qui entend favoriser une démarche pédagogique socio-constructiviste. Nous pensons qu'il devrait permettre l'élaboration d'une séquence d'enseignement qui se situerait à l'intersection des axes pédagogique (axe horizontal) et épistémologique (axe vertical) du modèle défini par les didacticiens Martine Méheut et Dimitris Psillos (voir Figure 37)

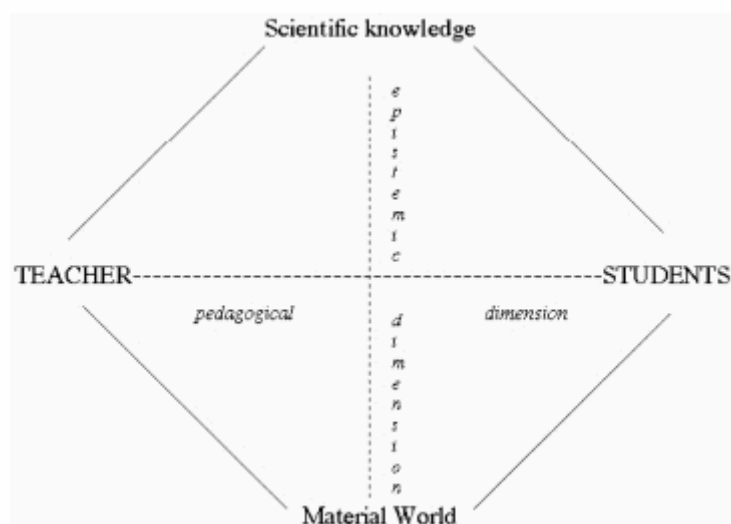


Figure 37 : Losange didactique. Cette représentation modélise une situation d'enseignement-apprentissage. Elle intègre une dimension épistémologique (i.e. la façon dont le savoir scientifique se construit en référence au monde matériel), et une dimension pédagogique fondée sur les théories de l'apprentissage. Cette dimension renvoie aux stratégies mises en œuvre par l'enseignant pour favoriser l'apprentissage. Ce modèle tient compte des représentations des élèves symbolisées par l'axe « élèves-monde matériel »³²⁶.

³²⁶ Méheut M. et Psillos D. Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research, in *International Journal of Science Education*, vol. 26, n°5, avril 2004, 517.

La structure générale du texte est inspirée de la reconstruction historique que nous avons présentée au chapitre précédent. Chaque étape de la réflexion s'appuie sur les éléments qui, de notre point de vue, constituent les idées-clés de l'élaboration rationnelle des théories de la vision, à savoir :

- Les cinq sens fonctionnent sur un principe identique : un organe spécifique est sensible à un *stimulus* extérieur,
- Une lumière trop forte « blesse » les yeux,
- Les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent.
- La lumière renvoyée par les objets ordinairement éclairés pénètre dans l'œil.

Ces idées-clé forment l'ossature autour de laquelle notre dialogue s'organise. Celui-ci intègre également une part des raisonnements spontanés des élèves à propos de la vision et du rôle de la lumière dans la vision. Notre texte trouve son point d'ancrage dans la polémique autour du sens de la vue. Progressivement il va conduire les élèves à construire une explication du mécanisme de la vision qui s'appuie sur une nouvelle idée de la lumière. Ce texte a pour vocation de guider l'élève dans sa démarche de conceptualisation et de modélisation. Il propose un itinéraire cognitif qui s'inspire du cheminement historique. Nous avons cherché à aménager des transitions en créant des filiations entre des idées qui nous semblaient parfois indépendantes les unes des autres, de façon à rendre le passage de l'une à l'autre plus aisé. L'organigramme ci-dessous (voir Figure 38) rend compte de l'architecture générale du dialogue, des transitions (le plus souvent sous forme de sauts conceptuels) et des paliers de raisonnement. Les différentes étapes sont détaillées à la suite du *Dialogue* (voir Texte 1).

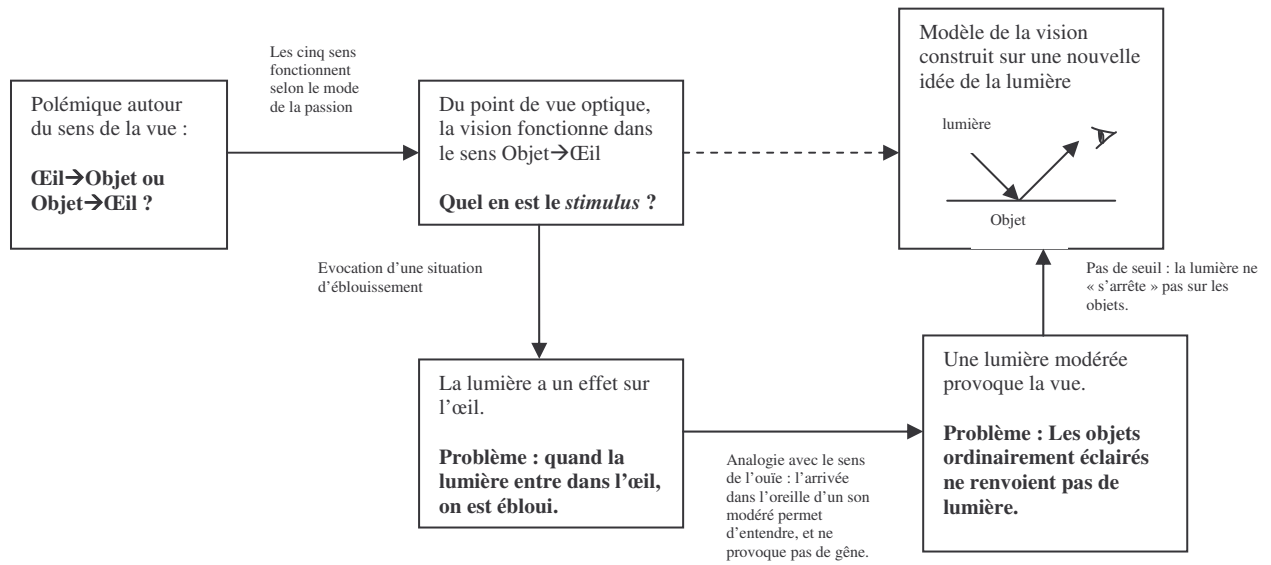


Figure 38 : Organigramme représentant la structure du *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*. Les flèches en traits pleins représentent l'itinéraire cognitif du texte. La flèche en pointillés désigne le parcours habituellement emprunté par l'enseignement.

Le texte présenté ci-dessous est une discussion entre trois personnages, Simplicio, Sagredo et Salviati. Il s'inspire, dans sa structure du *Dialogue* de Galilée. Cette discussion est construite à partir des différentes théories de la vision qui ont jalonné l'histoire des sciences de l'Antiquité grecque jusqu'au 17^e siècle.

Dialogue sur les manières dont se fait la vision

Cécile de Hosson

Sagredo : [A] Je vous ai réunis aujourd'hui afin que nous discussions ensemble de la manière dont se fait la vision.

Simplicio : Je crains, mon cher ami, que notre discussion ne soit difficile, car je crois savoir que Salviati et moi-même sommes en désaccord sur ce point. Pour ma part, les raisons de la vision résident dans l'œil. Comme le suggèrent de nombreux savants de l'Antiquité, je crois que pour voir un objet, l'œil doit envoyer quelque chose vers cet objet. C'est ainsi, voyez-vous, que je conçois que l'on voit les objets qui nous entourent, par ce pouvoir que nous avons d'émettre quelque chose qui, sortant des yeux, va à la rencontre des objets à regarder.

Sagredo : Il me semble que tous les Grecs ne raisonnaient pas ainsi. N'est-il pas exact que Lucrèce et d'autres avant lui expliquent la vision d'un objet par l'entrée dans l'œil d'une image de cet objet ?

Salviati : Sachez avant toute chose, que je me réjouis de vous parler de Lucrèce. Ses textes sont d'une beauté qui chaque fois m'émeut. Et si vous ne partagez guère son opinion, j'espère au moins que vous saurez apprécier la grandeur de sa poésie.

Sagredo : Ne nous faites pas attendre davantage.

Salviati : Voilà : « De tous les objets, il existe ce que nous appelons les simulacres : sortes de membranes légères détachées de la surface des corps, qui voltigent en tout sens parmi les airs. Ce sont des figures, des images qui sont émises par les objets. On en voit d'ailleurs beaucoup émettre de leurs éléments, comme la fumée du bois vert ou la chaleur de la flamme, ou encore comme les tuniques que les cigales abandonnent en été. Ou encore, comme les voiles jaunes, rouges ou verts, qui tendus dans les vastes théâtres au-dessus du public et éclairés par des torches ou par la lumière du jour, colorent la scène de leurs reflets ».

Simplicio : Cette théorie me semble absurde : comment pouvez-vous expliquer que des effluves détachés d'objets immenses, comme des montagnes, par exemple, puissent pénétrer dans notre œil, qui est lui, tout petit ?

Salviati : J'aimerais vous rappeler qu'en vous exposant les idées de Lucrèce je n'ai fait que répondre à la demande de Sagredo. Je ne vous ai jamais dit que je les partageais. Elles présentent en effet certaines incohérences mais néanmoins, elles me semblent plus proches de ma théorie personnelle que la vôtre.

Sagredo : Vous pensez donc que si l'on voit c'est que les objets envoient des images d'eux-mêmes dans nos yeux ?

Salviati : Ce n'est pas ce que je dis. Néanmoins, je retiens de cette théorie qu'elle pose le problème de la vision comme le résultat d'une action sur l'œil. Et ce qui me semble intéressant ici c'est que la vision est considérée comme une passion, c'est-à-dire comme la réception dans l'œil de quelque chose provenant de l'extérieur.

Sagredo : N'est ce pas sur ce principe que fonctionnent tous nos sens ?

Salviati : Vous touchez là un point crucial, Sagredo. Si l'on en croit Aristote, il semble que les cinq sens fonctionnent tous de la même façon. Ils sont le résultat d'une action extérieure (le stimulus) sur un organe spécifique appelé organe sensoriel. Chaque organe sensoriel se trouve affecté par des impressions spécifiques venant des objets. Ainsi, nous entendons parce que nous recevons du son dans l'oreille, nous sentons car nous recevons...

Simplicio : ... des odeurs dans le nez...[B]

Salviati : ...Nous avons la sensation du goût car notre bouche reçoit des saveurs, et ainsi de suite. Et puisque mon objectif est de vous convaincre que la vision est une passion, en ce sens qu'elle est le résultat d'une action sur l'œil, j'ai là un argument qui sans doute vous convaincra plus que tout autre. Permettez-moi tout d'abord de vous poser une question : Pensez-vous pouvoir regarder fixement le Soleil pendant dix secondes ? [C]

Simplicio : Quelle idée !.

Sagredo : Assurément non, cela serait bien trop douloureux, et préjudiciable pour la vue.

Salviati : Précisément. Et savez-vous pourquoi ?

Sagredo : Sans doute parce que la lumière provenant du Soleil est trop forte.

Salviati : Bien. Vous admettez donc qu'une lumière trop forte provoque des effets douloureux sur l'œil, et que, par conséquent, l'œil est sensible à une lumière trop forte. On ne peut pas penser qu'il y ait quelque chose qui aille de l'œil vers l'objet car, dans cette situation il n'y aurait pas de raison de souffrir en face d'un objet plutôt que d'un autre. Si l'on est ébloui en regardant le Soleil, c'est bien parce que de la lumière forte entre dans l'œil.

Sagredo : Je suis en tout point d'accord avec vous, cher Salviati, mais n'oubliez pas que nous cherchons à comprendre la manière dont on voit, pas la manière dont on ne voit pas. Or la situation que vous décrivez, celle de l'éblouissement, est totalement opposée à la vision.

Simplicio : Décidément, vous vous égarez, Salviati, Sagredo a raison, l'entrée de lumière dans l'œil empêche de voir.

Salviati : Permettez-moi de vous corriger, Smplicio. Vous dites, « l'entrée de lumière dans l'œil empêche de voir », et moi je dis, l'entrée d'une très forte lumière dans l'œil empêche de voir. Percevez-vous la nuance ?

Simplicio : Certes, mais je ne vois pas où vous voulez en venir. Ne sommes-nous pas ici pour parler de la manière dont se fait la vision ? Venez-en au fait, je vous prie.

Salviati : Malheureusement, il me faudra prendre quelques détours pour parvenir à vous convaincre du bien-fondé de ma théorie. Vous remarquerez que lorsque vous êtes éblouis, la sensation désagréable perdure, vous empêchant notamment de lire pendant un temps. Ainsi, une lumière forte affecte non seulement l'œil mais aussi la vue. De même qu'un son trop fort blesse le tympan tandis qu'un son modéré parvenant à nos oreilles provoque l'ouïe. [D]

Sagredo : Si je comprends bien votre comparaison, cher Salviati, une lumière modérée provoquerait la vue ?

Simplicio : Mais c'est absurde ! Lorsque nous regardons le monde autour de nous, ce sont bien les objets que nous voyons et ceux-ci ne nous envoient pas de lumière. Si tel était le cas, nous serions continuellement éblouis !

Salviati : Calmez-vous, Smplicio, et tachez de suivre mon raisonnement. N'est-il pas vrai que pour voir un objet non lumineux par lui-même, celui-ci doit être éclairé ?

Sagredo : En effet, nul ne songerait à penser que l'on voit dans le noir.

Simplicio : Seuls les chats sont capables de cet exploit.

Salviati : Laissons les chats pour le moment voulez-vous, tant il est vrai qu'ils ne voient pas plus dans le noir que vous et moi. Donc pour voir un objet il faut que celui-ci soit éclairé. Moins un objet est éclairé, moins il est visible, et plus il est éclairé, plus il est visible. Si toutefois, il est trop éclairé, la vue est altérée, et la vision de l'objet devient impossible. Ce phénomène n'est-il pas similaire à celui dont nous avons déjà parlé, à savoir l'éblouissement que nous ressentons en regardant le Soleil ?

Sagredo : Assurément. Un objet éclairé par une lumière très intense se comporte donc comme le Soleil. Il renvoie dans l'œil une lumière trop forte, et cette lumière blesse les yeux. C'est ce qui se passe par exemple lorsque l'on regarde la neige au Soleil.

Salviati : Bien ! Voilà que vous raisonnez avec la lumière. Imaginez maintenant que cet éclairage diminue progressivement. Si vous voyez l'objet, c'est qu'il est toujours éclairé, n'est-ce pas ? Et si vous le voyez parfaitement, si vous parvenez à distinguer ses moindres détails, c'est que vous n'êtes plus gêné par l'entrée dans votre œil d'une lumière trop forte. Or dans ce cas, ce qui a changé, ce n'est pas l'entrée de lumière dans l'œil, mais sa quantité. Autrement dit, l'œil a la sensation de l'éclairage, et cette sensation est commandée par la quantité de lumière qui pénètre l'œil. Un homme voit lorsque la quantité de lumière provenant des objets et qui pénètre son œil n'est ni trop forte, ni trop faible. Cette théorie nous vient d'un savant arabe du nom d'Alhazen.

Simplicio : Cela signifie-t-il que tous les objets qui nous entourent renvoient continuellement de la lumière dans nos yeux, alors même que nous n'en avons aucun signe ?

Sagredo : Aucun signe dites-vous ? Le simple fait de voir ces objets n'est-il pas significatif d'une présence de lumière ?

Salviati : Je vois, cher Sagredo, que vous semblez convaincu. Simplicio, qu'en pensez-vous ?

Simplicio : Je dois avouer que je suis séduit par votre théorie. [E]

Texte 1 : *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*. Nous avons indiqué ci-dessous les étapes qui constituent la procédure cognitive que nous entendons proposer aux élèves. Celles-ci reprennent les étapes de l'élaboration rationnelle des théories de la vision que nous avons présentées dans notre chapitre historique. Les lettres A, B, C, D et E sont des repères que nous utiliserons tout au long de notre analyse.

Etape n°1 : Polémique autour du sens de la vue (A→B)

Les trois personnages sont réunis à l'initiative de Sagredo qui souhaite comprendre comment « se fait la vision ». Le dialogue s'ouvre sur une polémique. Pour Simplicio la vision résulte d'une émission depuis l'œil vers les objets. Sagredo, qui ne sait pas réellement comment fonctionne la vision, oppose à cette idée celle des atomistes grecs (celle de Lucrèce notamment) : « la vision d'un objet s'explique par l'entrée dans l'œil d'une image de cet objet ». C'est un raisonnement par l'absurde (le mot est d'ailleurs prononcé) qui conduit Simplicio à rejeter cette théorie³²⁷ : comment est-il possible, nous dit-il, que l'image d'une montagne immense puisse entrer dans l'œil « qui est, lui, tout petit » ? Salviati ne prend pas immédiatement part au débat. Il s'offre le plaisir de rappeler dans un premier temps le contenu exact des idées de Lucrèce, mais il ne se prononce ni en faveur des idées de Simplicio, ni en faveur de celles des atomistes. Toutefois, il admet que ces dernières ont le mérite de « poser le problème de la vision comme le résultat d'une passion ».

Etape n°2 : Unité de fonctionnement des cinq sens (A → B)

Sagredo se demande si tous les sens ne fonctionnent pas sur le mode de la passion. Son questionnement permet à Salviati d'initier le processus cognitif qui va conduire ses interlocuteurs vers une explication rationnelle du mécanisme de la vision. Afin de les convaincre du fait que les cinq sens fonctionnent sur un principe identique, il fait appel à l'autorité d'Aristote et il illustre son propos par trois exemples (celui de l'ouïe, du son et du goût) en associant, pour chaque sens concerné, l'organe sensoriel à son *stimulus*. Il fait en sorte de ne pas associer à ces exemples le sens de la vue. A partir du moment où Simplicio et Salviati admettent que les sens fonctionnent sur le mode de la passion (et donc que la vue relève de l'intromission), la suite de la conversation se voit consacrée à l'identification du *stimulus* de la vue.

³²⁷ Selon la définition du linguiste Jean-Jacques Robrieux, « un raisonnement par l'absurde consiste à envisager la ou les conclusions autres que celles à laquelle on veut aboutir et, le cas échéant, toutes les conséquences qu'elles entraînent, afin d'en montrer 'l'absurdité', c'est-à-dire le caractère illogique, contraire au bon sens, à un principe déjà admis, ou tout simplement impossible », Robrieux J.J *Éléments de rhétorique et d'argumentation*, Dunod, 1993, p. 119. Ici Simplicio montre que la théorie de Lucrèce conduit à envisager qu'un œil peut recevoir l'image d'objets immenses, ce qui paraît contraire au bon sens. Historiquement, l'argument de l'image de la montagne se voit contré par les intromissionnistes qui avancent que les images sont en fait rapetissées avant de pénétrer dans l'œil.

Etape n°3 : Le phénomène de l'éblouissement (B → C)

L'évocation d'une situation d'éblouissement par Salviati a une double fonction. D'une part elle constitue un argument supplémentaire contre l'extramission (si l'œil envoyait quelque chose vers les objets alors « il n'y aurait pas de raison d'être ébloui en face d'un objet plutôt que d'un autre ») et d'autre part, elle conduit à reconnaître que la lumière a un effet sur l'œil. Sagredo et Simplicio semblent quelque peu déstabilisés par la manœuvre intellectuelle de Salviati. En effet, la discussion a pour objet la vision et dans l'exemple de l'éblouissement celle-ci est difficile, voire impossible. En outre, ils expliquent la sensation d'éblouissement par le fait que la lumière pénètre l'œil, ce qui fait dire à Simplicio que « l'entrée de lumière dans l'œil empêche de voir ».

Etape n°4 : Traitement quantitatif de la lumière, raisonnement par analogie (C → D)

Tout le travail de Salviati consiste désormais à préparer le saut conceptuel qui permettra à ses interlocuteurs d'admettre que le fait que la lumière entre dans les yeux ne s'accompagne pas nécessairement d'une gêne. Pour cela, il va les faire passer d'un raisonnement fondé sur la lumière à un raisonnement fondé sur la quantité de lumière. L'objectif est qu'ils expliquent la sensation d'éblouissement par l'entrée **d'une trop grande quantité de** lumière dans l'œil, et non par le simple fait que la lumière entre dans l'œil. Pour cela, il recourt à un raisonnement par analogie dont Jean-Jacques Robrieux nous rappelle le principe :

Le principe du raisonnement par analogie consiste à affirmer que A est à B ce que C est à D. Ce qui peut être énoncé sous la forme algébrique $A/B = C/D$. On appelle *phore* (i.e. comparant) la relation déjà admise et *thème* (i.e. comparé) la relation à faire admettre. On voit que le raisonnement analogique vise à faire comprendre une idée en la transposant dans un autre domaine, une autre isotopie. Le rôle pédagogique de l'analogie est aussi important que son rôle heuristique (...). En argumentation l'analogie est surtout employée à des fins persuasives (...). Il faut avant tout frapper l'auditoire à l'aide d'images saisissantes, utiliser le connu pour faire comprendre l'inconnu. Parfois même, le connu est de l'ordre du présupposé, ce qui implique un accord avec l'auditoire sur la réalité du phore³²⁸.

L'objectif de Salviati est de transposer le mécanisme de la vision au mécanisme de l'ouïe. Il suppose comme admise la relation entre « entrée d'un son modéré dans l'oreille » et « ouïe », pour faire admettre la relation entre « entrée d'une lumière modérée » et « vision ». Cette analogie entre ouïe et vision vient compléter l'idée d'une unité dans le fonctionnement des cinq sens précédemment évoquée par Sagredo et Salviati. Si Sagredo semble réceptif à cette

³²⁸ Robrieux J.J. Ibid. 150-151.

nouvelle idée, Simplicio quant à lui la rejette. Son argument est le suivant : si la vision des objets s'explique par l'entrée de la lumière dans l'œil alors il est nécessaire que ceux-ci envoient de la lumière, ce qui n'est pas le cas, puisque l'on n'est pas ébloui.

Etape n°5 : Diffusion et modèle de la vision (D → E)

Cette étape est marquée par l'exposition d'une nouvelle théorie qui rompt avec l'empirisme et le sens commun. Contrairement à ce que pense Simplicio, le fait que la sensation d'éblouissement cesse ne signifie pas que la lumière ne pénètre plus dans l'œil. Autrement dit, le moment où la sensation de gêne ou d'éblouissement apparaît ne doit pas être défini comme un seuil à partir duquel la lumière entre dans les yeux. Pour cela, il est nécessaire que Simplicio rompe la relation de causalité qu'il établit entre l'arrivée de la lumière dans l'œil et la sensation d'éblouissement. C'est ainsi qu'il pourra admettre que la lumière entre dans l'œil alors qu'il ne s'en rend pas compte. Cette idée nécessite un effort d'abstraction important qui justifie l'attitude quelque peu autoritaire de Salviati à ce moment de la conversation. Il assume sa fonction de détenteur du savoir et sa démarche se veut plus directive. Il invite ses interlocuteurs à « suivre son raisonnement », à se laisser guider, et il refuse les digressions (celle de la vision nocturne du chat notamment). Cette posture permet l'exposition d'une démarche de pensée qui va conduire Sagredo et Simplicio à accepter l'idée que les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent dans les yeux sans que cela provoque une quelconque gêne, et que c'est grâce à cela que l'on voit. Simplicio quitte alors son rôle de contradicteur, et le dialogue s'achève sur un *consensus*.

5.2. Expérimentation autour du *Dialogue sur les manières dont s'effectue la vision*

Nous allons désormais nous intéresser à la façon dont des élèves n'ayant jamais reçu d'enseignement d'optique s'approprient notre dialogue. Nous espérons montrer que son utilisation peut constituer un moyen d'assister efficacement l'apprentissage du mécanisme optique de la vision.

Ainsi que nous venons de le voir, notre texte présente un itinéraire cognitif inspiré d'une reconstruction rationnelle de l'histoire des théories de la vision. Notre intention est de proposer aux élèves une situation d'apprentissage construite à partir de ce texte, et de suivre pas à pas leur cheminement. En analysant leurs réactions, en les confrontant avec celles que

nous aurons anticipées, nous entendons dégager les éléments qui nous permettront de mesurer l'impact pédagogique et didactique de cette situation d'apprentissage³²⁹.

Pour cela, nous faisons le choix d'expérimenter notre outil d'enseignement, non pas lors d'une séance de classe, mais au cours d'entretiens réalisés avec six binômes d'élèves de quatrième interrogés successivement, avant l'enseignement de l'optique. Dans une perspective socio-constructiviste, nous entendons profiter des apports cognitifs suscités par le débat contradictoire entre élèves. La conduite de l'entretien est présentée sous la forme d'un scénario fondé sur une lecture suivie du texte. Elle s'appuie sur la progression schématisée par l'organigramme Figure 38, et sur l'introduction du fonctionnement de la pupille qui, nous le savons, a joué dans l'histoire des théories de la vision un rôle non négligeable. Pour chacune de nos questions ou interventions, nous indiquerons les réactions probables ou les effets supposés. Ces associations *a priori* (question/réaction) constitueront les hypothèses que nous souhaitons mettre à l'épreuve de l'expérimentation. Enfin, chaque entretien est prévu pour une durée d'une heure.

5.2.1. Présentation du scénario de l'entretien

L'entretien débute par une phase de présentation du problème à résoudre, celui du mécanisme de la vision. Dans un premier temps, nous demandons aux élèves de répondre à la question suivante : « **comment voit-on les objets qui nous entourent ?** » Nous leur précisons qu'ils peuvent, s'ils le souhaitent, illustrer leur réponse d'un dessin. Si la plupart d'entre eux devrait évoquer l'idée d'une émission depuis l'œil vers l'objet, certains feront peut être l'hypothèse d'une réception par l'œil de « quelque chose » émis par l'objet. Mais nous ne nous attendons pas à ce que « quelque chose » soit identifié à la lumière. Il est possible que dans un même binôme les élèves s'opposent sur le « sens » de la vue créant ainsi une polémique qu'ils

³²⁹ Notre recherche se conforme aux recommandations formulées par Méheut et Psillos. Dans un article publié récemment, ils proposent une revue des différentes modalités de validation des situations d'enseignement-apprentissage utilisées dans les travaux de recherche didactique, et ouvrent quelques pistes de réflexion. L'idée que nous retiendrons est que le suivi et la description précise du processus mis en œuvre par l'élève au cours d'une situation d'apprentissage permet de valider (ou d'infirmer) les hypothèses sous-jacentes aux intentions de la situation choisie. Voir à ce sujet Méheut M. et Psillos D. Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research, op. cit. Pour une description des modalités de réalisation et d'analyse de séquences d'enseignement on pourra se référer aux travaux de Michel Artigues. Voir en particulier, Artigues M. Ingénierie didactique in. *Actes de la 5^e Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques*, Plestin les Grèves, août 1989.

retrouveront exprimée dans le *Dialogue*, et à laquelle ils s'identifieront peut-être. Sans nous prononcer sur la justesse de leurs réponses, nous leur présentons le texte qui devrait aider leur réflexion : « **Afin de comprendre comment fonctionne la vision, nous allons travailler à partir d'un texte. Ce texte est une conversation entre trois personnages qui discutent de la façon dont se fait la vision** ». Nous leur proposons alors de lire le début du texte, jusqu'à « ... des odeurs dans le nez ? » (repères A à B)³³⁰.

Cette deuxième phase a pour objet d'amener les élèves à accepter que la vue s'explique exclusivement dans un sens objet→œil. Nous leur posons alors la question suivante : « **Pensez-vous que les sens obéissent aux mêmes principes de fonctionnement ?** ». Nous faisons l'hypothèse qu'ils souscriront à l'opinion de Sagredo et de Salviati, et qu'ils admettront que les sens fonctionnent tous sur le mode de la passion. Les exemples choisis par Salviati devraient les aider à accepter l'idée que la sensation est fondée sur l'action d'un agent extérieur sur un organe spécifique. S'ils se rangent du côté des intromissionnistes, ils devraient, à ce moment de l'entretien, commencer à s'interroger sur la nature de ce qui entre dans l'œil. Peut-être parleront-ils alors d'images ? Cette étape devrait leur poser quelque difficulté car s'il semble aisé d'identifier le *stimulus* de l'odorat ou de l'ouïe, il n'en est pas de même pour la vue.

L'entretien se poursuit par une nouvelle étape de lecture depuis « ...Nous avons la sensation du goût... » jusqu'à « ... pendant dix secondes ? » (repères B à C). C'est la troisième phase de l'entretien. Nous leur demandons simplement de répondre à la question posée par Salviati et de justifier leur propos. Ils devraient tous répondre que regarder le Soleil est impossible car dangereux. Sans doute parleront-ils d'éblouissement. Si tel est le cas, nous chercherons à savoir comment ils comprennent ce phénomène. Ils devraient alors expliquer les raisons de l'éblouissement par l'arrivée dans l'œil d'une très (trop ?) grande quantité de lumière.

Nous leur posons ensuite la question suivante : « **Pensez-vous que l'on puisse être ébloui par un objet ordinaire ?** » Nous entrons alors dans la quatrième phase de notre entretien. Nous pensons que la plupart des élèves admettra qu'il est possible d'être ébloui par un objet

³³⁰ D'une façon systématique, à l'issue de chaque étape de lecture, nous demanderons aux élèves de résumer ce qu'ils ont lu. Cela nous permettra de nous assurer que le texte a bien été compris.

ordinaire à condition que celui-ci soit fortement éclairé. Ils expliqueront sans doute que dans ce cas, l'objet renvoie dans l'œil la lumière qu'il reçoit. Nous chercherons alors à savoir s'ils pensent que ce renvoi est systématique à partir du moment où l'objet est éclairé ou s'ils imaginent que ce renvoi est fonction de la quantité de lumière qui atteint l'objet. Cette investigation sera initiée par une question du type : « **Est-ce que cet objet [un stylo posé sur la table] envoie de la lumière dans vos yeux ? Comment le savez-vous ? Comment pourriez-vous savoir que cet objet vous envoie de la lumière ?** » Nous nous attendons à ce que les élèves émettent l'idée d'un seuil en dessous duquel un objet éclairé ne renvoie plus de lumière. Ce seuil devrait correspondre au cas où ils ne sont plus éblouis par l'objet. Notre objectif sera alors de les faire passer d'un raisonnement qui associe « entrée de lumière dans l'œil » et « sensation d'éblouissement » à « entrée de lumière dans l'œil » et « vision ». Un tel passage nécessite que l'élève se construise une nouvelle idée de la lumière qui rompe avec celle qu'il en a jusqu'à présent. Il va falloir qu'il passe d'une représentation où la « lumière » est considérée comme un objet visible qui, lorsqu'elle rentre dans l'œil éblouit, au concept de *lumière* comprise comme une chose invisible qui, en entrant dans l'œil, provoque la vision.

Nous entamons alors la cinquième phase de notre entretien. Nous invitons les élèves à poursuivre la lecture du texte depuis « Quelle idée ! » jusqu'à « ...provoque l'ouïe » (repères C à D). Nous souhaitons qu'ils raisonnent à partir de l'analogie présentée par Salviati. Pour cela, nous leur demanderons si les deux situations (celle de l'ouïe et celle de la vue) leur semblent comparables : « **Pensez-vous que Salviati a raison de comparer la vue à l'ouïe, et que ce qui est valable pour le son, le soit également pour la lumière, c'est à dire que l'entrée dans l'œil d'une lumière modérée provoque la vue ?** » Cette phase n'a pas pour objectif immédiat de faire admettre aux élèves que la vision est le résultat de l'entrée de la lumière dans l'œil. Toutefois, ce raisonnement par analogie devrait permettre à certains d'amorcer le processus d'abstraction qui les conduira à reconnaître que la lumière peut pénétrer l'œil sans que cela provoque une quelconque gêne. Cette phase repose bien évidemment sur l'hypothèse d'une adhésion des élèves à l'analogie proposée par Salviati, mais la difficulté est telle que nous prévoyons qu'à ce stade de l'entretien la plupart des élèves refuseront encore de dissocier « sensation d'éblouissement » et « entrée de la lumière dans l'œil », et qu'ils continueront à affirmer que lorsqu'un objet est éclairé et qu'il n'éblouit pas c'est que la lumière « reste » sur l'objet et qu'elle n'en repart pas.

La sixième phase de notre entretien consiste à faire admettre aux élèves qu'un objet ordinairement éclairé renvoie la lumière qu'il reçoit (mais en moindre quantité) alors même qu'ils ne se rendent pas compte de son arrivée dans l'œil, et que c'est cela qui rend cet objet visible (et non pas le simple fait qu'il soit éclairé). Nous leur proposons de lire le texte jusqu'à la fin (depuis « Si je comprends bien » jusqu'à « ...je suis séduit par votre théorie », repères D à E). Suite à cette lecture, nous leur demandons de formuler une nouvelle explication de la vision. Si cette explication s'avère conforme à l'objectif que nous nous sommes fixé, il sera important que nous sachions à quel moment de la lecture ils pensent avoir compris et pourquoi. Nous espérons qu'ils adoptent un raisonnement dans lequel la lumière est traitée de façon quantitative, et qu'ils acceptent que le passage de l'éblouissement à la vision n'est pas commandé par l'arrêt brutal de l'entrée de la lumière dans l'œil, mais par une diminution de la quantité de lumière qui pénètre l'œil. En d'autres termes, cette dernière partie de dialogue doit permettre aux élèves de passer d'un raisonnement construit en référence au principe du « tout ou rien » (la lumière rentre dans l'œil, je suis ébloui ; la lumière ne rentre plus, je vois), à un raisonnement plus complexe exprimé en termes de « trop », « suffisamment » ou « pas assez » : il s'agit alors d'associer la sensation d'éblouissement au « trop » de lumière, la vision au « suffisamment » et l'absence de vision au « pas assez ».

Dans le texte, il est fait référence à la vision nocturne du chat. Nous avons montré que cette question a suscité de nombreuses discussions dans l'histoire et que les savants les plus avertis (Kepler et Descartes notamment) ont soutenu l'idée que les yeux des chats émettaient leur propre lumière, alors qu'ils expliquaient le mécanisme optique de la vision humaine de façon rationnellement acceptable. Dans la septième phase de notre entretien, nous invitons les élèves à se prononcer sur la vision nocturne du chat : « **Est-il exact que les chats voient la nuit, pourquoi ?** ». Cette question est illustrée par la Figure 39 ci-après que nous présentons aux élèves en leur demandant d'expliquer ce qui est représenté.

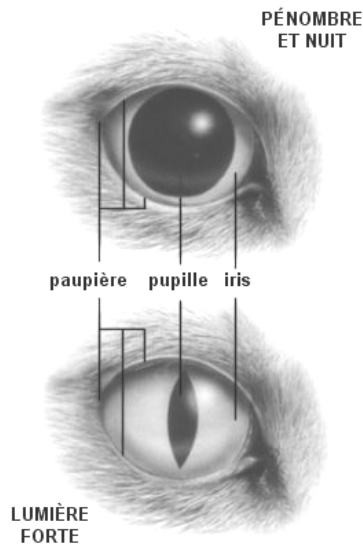


Figure 39 : Représentation de l'œil du chat éclairé par une faible quantité de lumière (œil du haut), et par une quantité importante de lumière (œil du bas).

Nous souhaitons qu'ils comprennent que la pupille est un régulateur de quantité de lumière. Dans le dessin du haut, la pupille du chat est très dilatée ce qui permet à une quantité maximale de lumière de pénétrer l'œil, tandis que dans le dessin du bas la pupille est plus resserrée ce qui évite au chat d'être ébloui par « la lumière forte ». Cela devrait amener les élèves à conclure que le chat ne voit pas dans l'obscurité totale mais qu'il est capable de distinguer des objets éclairés très faiblement. La justification que nous attendons est que, dans ce cas, la quantité de lumière provenant des objets et qui entre dans l'œil est suffisante pour permettre au chat de voir les objets qui l'entourent.

La huitième phase de notre entretien est consacrée à la vision des ombres. Elle constitue en quelque sorte une phase d'évaluation. Il s'agit pour les élèves d'expliquer les raisons pour lesquelles l'ombre de la fleur (sur la photo ci-dessous, voir Figure 40) est visible : « **Pouvez-vous expliquer pourquoi vous voyez l'ombre de la fleur sur cette photo ?** ». L'objectif de cette question est de voir si les élèves sont capables de transférer un raisonnement en quantité de lumière à une situation différente, celle de la vision des ombres, et s'ils l'associent au modèle de la vision tel qu'ils l'auront construit.



Figure 40 : Photographie d'une fleur éclairée en lumière blanche.

Une ombre est une zone moins éclairée. Elle est visible par contraste avec des zones éclairées plus intensément. L'explication que nous visons est la suivante : la partie de la photo la moins lumineuse envoie moins de lumière vers l'œil, tandis que la zone plus lumineuse envoie davantage de lumière. C'est la raison pour laquelle l'œil est capable de distinguer deux zones dont l'une paraît plus « foncée » que l'autre. Cette explication va se heurter aux idées que les élèves se font des ombres : pour un élève, une ombre est une « chose », une entité matérielle grise ou noire³³¹ ; dans le meilleur des cas, elle est perçue comme zone de l'espace qui ne reçoit pas du tout de lumière et non comme une zone qui, tout en étant privée de la lumière issue d'une source donnée, reste éclairée (faiblement) par des objets environnants. Nous pensons qu'il sera très difficile pour les élèves de dire que l'ombre est visible car elle envoie vers l'œil moins de lumière que la surface qui l'entoure. Toutefois, nous espérons que par un traitement quantitatif ils parviendront à expliquer que la partie sombre correspond à une aire qui reçoit moins de lumière que la zone plus lumineuse, et ce, parce qu'une partie de la lumière déjà renvoyée par la fleur n'arrive pas sur le mur. Là encore il s'agira pour l'élève de passer d'un raisonnement en « tout ou rien », à un raisonnement en « plus ou moins ».

³³¹ On trouvera une synthèse très complète des recherches consacrées aux idées des enfants à propos des ombres dans l'ouvrage du sociologue Roberto Casati, *La découverte de l'ombre*, Albin Michel, 2002. Les concepteurs des programmes de sciences du cycle III ont pris la mesure de la difficulté liée à ces idées et rappellent explicitement que « pour certains élèves, l'ombre a les propriétés des objets matériels ». En outre, ils mettent en garde les enseignants et ajoutent que « l'affirmation 'l'ombre est une zone qui ne reçoit pas de lumière' est en générale incorrecte car imprécise. En effet, l'ombre d'un objet par rapport à une source déterminée est une zone qui ne reçoit pas de lumière provenant de cette source, mais elle reçoit en général la lumière émise ou diffusée (renvoyée) par les objets environnants », Ombre et Lumière, Fiche Connaissance n°17, op. cit.

Nous concluons notre entretien en demandant aux élèves d'exprimer leur avis sur le texte : « Pensez-vous que ce type de texte soit un bon outil pour apprendre les sciences ? Est-ce que ce dialogue vous a aidé, pourquoi ? » Il nous semble important de tenir compte de la façon dont le texte est perçu par les élèves. Le trouveront-ils complexe, adapté à la situation d'apprentissage proposé ? Le perçoivent-ils comme une aide à la compréhension, ou au contraire comme un obstacle ? L'analyse qui va suivre devrait nous permettre d'apporter quelques éléments de réponse à ces questions et de valider (ou d'infirmar) les hypothèses qui ont jalonné le scénario que nous venons de présenter.

5.2.2. Analyse des entretiens

Nous proposons une synthèse des discussions que nous avons enregistrées puis retranscrites. Les résultats obtenus ne concernent que les 12 élèves que nous avons interviewés. Par conséquent, ils ne peuvent pas faire l'objet d'une quelconque généralisation³³². Malgré tout, ils nous permettront sans doute de dégager un certain nombre de pistes de réflexion pour une utilisation de notre *Dialogue* en séance de classe.

1^{re} phase : Explication spontanée du mécanisme de la vision

Globalement, la moitié des élèves (6 sur les 12 interrogés) explique la vision par l'envoi de « quelque chose » depuis l'œil désigné par les termes « vision », « regard » ou encore un « radar ». Trois élèves disent que l'œil reçoit une « image » ou un « truc » de la part de l'objet. La lumière n'est spontanément évoquée que par un élève. Celui-ci interprète la vision d'une façon tout à fait satisfaisante : « la vue c'est la lumière qui entre dans l'œil ». Son explication est néanmoins rejetée par sa camarade ; selon elle, si la lumière entre dans les yeux, on est ébloui :

- | | |
|-----------|--|
| Etienne : | La vue, c'est la lumière qui entre dans l'œil, qui va sur la rétine et après le cerveau fait l'image. |
| Julie : | Moi je crois pas, parce que la lumière // La lumière ça éblouit si on t'en met dans l'œil. |
| Etienne : | Mais non, pas toujours ! Ça dépend s'il y en a beaucoup ou pas. Mais c'est la lumière qui permet de voir. |
| Prof : | Vous êtes d'accord ? |
| Julie : | Non, moi je crois que c'est l'objet qui envoie une image. Ça va être renversé par l'œil et le cerveau remet le truc à l'endroit. |

³³² Dans chacun des extraits présentés ici, Prof désigne nous-même.

Etienne et Julie (binôme 5) ne s'opposent pas sur le sens de la vue (ils l'envisagent tous les deux dans le sens objet→œil), mais sur la nature de l'entité qui, partant de l'objet, pénètre l'œil. Pour Etienne il s'agit de la lumière, pour Julie d'une image. Et ce qui est remarquable c'est qu'Etienne propose une explication dans laquelle la lumière est traitée de façon quantitative : « ça dépend s'il y en a beaucoup ou pas ».

Dans trois binômes (sur les six concernés par notre recherche) les élèves expriment des opinions contradictoires. Pour Océane l'œil envoie une « vision », tandis que pour Thomas l'œil reçoit des « trucs » de la part de l'objet. Leurs propos sont illustrés par la Figure 41 (Océane) et la Figure 42 (Thomas):

- Prof : Est-ce que vous pourriez expliquer comment on voit les objets qui nous entourent ?
 Océane : C'est la vision // **L'œil, il envoie une vision (...)**
 Prof : Vous voulez bien me montrer avec un dessin comment ça fonctionne votre vision.
 Océane : On dessine ce qu'on veut comme objet ? [Océane dessine Figure 41]

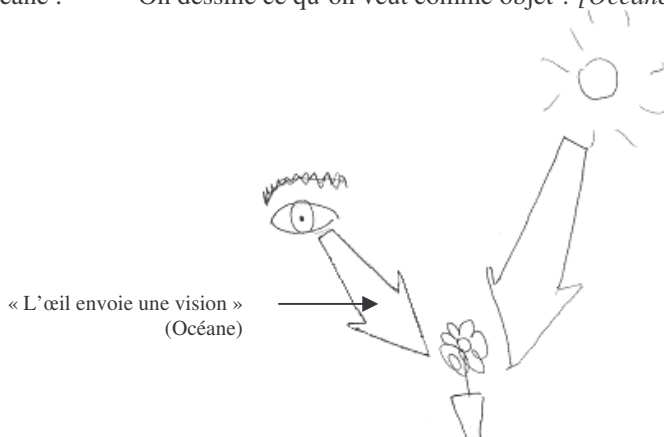


Figure 41 : Dessin d'Océane

- Prof : Oui oui // Alors, qu'est ce qui se passe ?
 Océane : L'œil, là, **il envoie une vision.**
 Prof : Dans ce sens là ?
 Océane : Oui.
 Prof : Vous pouvez mettre une flèche ? Merci. Bon, alors, il envoie une vision et après ?
 Océane : Ben après, on voit.
 Prof : Vous dites rien, vous, vous êtes d'accord avec ce dessin.
 Thomas : Non, parce que l'œil il a des capteurs, il envoie rien.
 Prof : Comment ça ? Expliquez-moi.
 Thomas : Moi je mettrais la flèche comme ça dans ce sens. [Thomas rectifie le dessin d'Océane Figure 42]
 Prof : Dans l'autre sens ?
 Thomas : Oui.

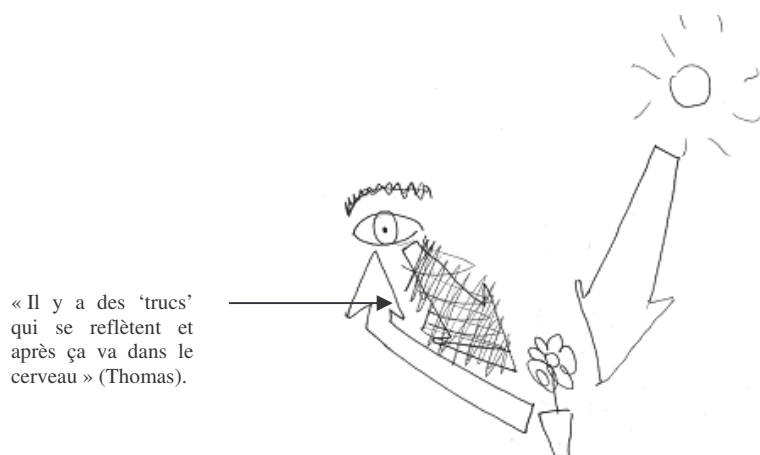


Figure 42 : Dessin d'Océane rectifié par Thomas

- Prof : Une flèche qui part de l'objet alors ? Qu'est ce qui part de l'objet ?
 Thomas : Je sais pas. Il y a des **trucs** qui se reflètent et après, ça va à l'envers dans le cerveau et le cerveau il fait des trucs.

Océane et Thomas (binôme 3) s'opposent sur le sens de la vue, tout comme Charles et Morgane (binôme 2), et Kevin et Florestan (binôme 6). Les discussions sont parfois virulentes ce qui souligne l'intérêt suscité par la question :

- Charles : Non, moi je suis pas d'accord. Il y a comme un **radar** dans l'œil. Un truc // un truc genre le regard qui sort.
 Morgane : Et c'est quoi ton radar ? // Non, en fait, les yeux, ils ont une **image** qui vient de l'extérieur // qui vient de l'objet. Parce que si on le voit, c'est qu'il y a quelque chose qui passe entre les deux.

Annabelle et Camille (binôme 1) s'accordent pour expliquer la vision dans un sens œil→objet. Leur réponse est accompagnée d'un dessin (voir Figure 43). Pour Annabelle l'œil envoie une « vision », pour Camille un « regard » :

- Prof : Je voudrais que vous m'expliquiez la vision, que vous m'expliquiez comment on voit les objets qui nous entourent ?
 Camille : C'est les yeux, ils regardent, **ils envoient une vision**.
 Annabelle : Oui, **l'œil envoie son regard**.

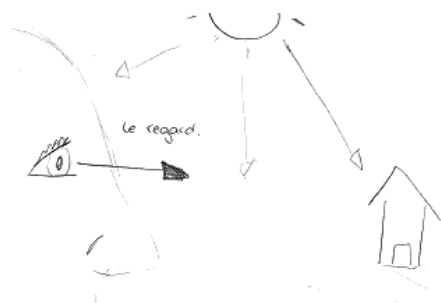


Figure 43 : Dessin réalisé conjointement par Camille et Annabelle (binôme 1). « L'œil envoie son regard vers la maison qui est éclairée par le Soleil ».

Enfin, Pierre et Alexis (binôme 4) jugent la question difficile et ne proposent aucune explication. Suite à ces échanges, les élèves restent chacun avec leur idée du « sens » de la vue. Cinq élèves expliquent la vue dans un sens oeil→objet, cinq dans un sens objet→œil³³³.

2^e phase : Les cinq sens fonctionnent sur un principe identique, celui de la passion

Nous leur proposons lecture du début du *dialogue*, depuis « Je vous ai réunis aujourd'hui... » jusqu'à « ...des odeurs dans le nez » (repères A à B). Suite à cette première période de lecture, certains élèves ne manquent pas de souligner qu'ils reconnaissent leurs idées (et leur désaccord) dans celles évoquées par les protagonistes de la conversation. C'est le cas des élèves des binômes 1 et 6 :

Prof : Alors, de quoi parle-t-il ce texte ?
 Florestan : Trois personnes font un débat. Ils sont pas d'accord. Il y en a une qui pense que c'est quelque chose qui sort et un autre qui pense que c'est quelque chose qui entre dans l'œil.
 Kevin : **Comme nous quoi.**

Notre objectif est ici d'amener les élèves à reconnaître que la vue fonctionne sur le même mode que tous les autres sens, à savoir, que l'organe sensoriel est stimulé par un agent extérieur. Nous leur demandons s'ils sont d'accord avec Salviati pour affirmer que tous les sens fonctionnent de la même façon :

Prof : Que dit Salviati à la fin de ce paragraphe ?
 Florestan : Que la vue est une // C'est où déjà, // une passion. Il parle de l'oreille qui reçoit, du nez et il pense que l'œil fait pareil.
 Prof : Et vous êtes d'accord ?
 Kevin : Je sais pas, **ce serait logique** pourtant. C'est peut-être une image qui part de l'objet.
 Florestan : Mais non, il dit dans le texte qu'il y en a qui sont trop grandes. En plus, c'est impossible que chaque objet ait quelque chose à refléter.
 Kevin : Peut-être, mais ce serait logique. Regarde, pour le goût, c'est pareil, la bouche elle reçoit.
 Florestan : Oui, c'est vrai, **ce serait logique**, mais bon, **c'est quoi le truc qui entre dans l'œil ?**

Tous les élèves reconnaissent la « logique » de l'argumentation aristotélicienne (le terme « logique » est d'ailleurs utilisé par 4 binômes sur 6 dans des expressions telles que « ça paraît logique » ou ça « serait logique »), et la comparaison explicite avec les autres sens s'avère

³³³ Les élèves qui expliquent la vision dans le sens œil→objet sont : Camille et Annabelle (binôme 1), Charles (binôme 2), Océane (binôme 3) et Kevin (binôme 6). Les élèves qui expliquent la vision dans le sens objet→œil sont : Morgane (binôme 2), Thomas (Binôme 3), Etienne et Julien (binôme 5) et Florestan (binôme 6).

probante. Morgane (binôme 2) en déduit par exemple « qu'à chaque fois, il y a un truc qui entre ». Parmi les cinq élèves qui avaient évoqué dans un premier temps l'idée d'un sens œil→objet, quatre disent qu'ils se sont finalement peut-être trompés³³⁴. C'est le cas notamment d'Océane (binôme 3) :

Prof : Est-ce que vous êtes d'accord avec Aristote ?
 Thomas : Celui qui dit que tous les sens fonctionnent de la même façon ? Oui.
 Océane : Oui.
 Prof : Ah ? Mais pourtant, vous, tout à l'heure vous avez dit que l'œil envoyait une vision vers l'objet, non ?
 Océane : Oui mais **je crois que je me suis trompée**. Ça doit marcher comme le son. Il y a un truc qui rentre dans l'œil.

Seule Camille (binôme 1) maintient son interprétation initiale :

Ce serait logique s'ils [les sens] fonctionnaient tous de la même façon, mais il n'y a pas d'équivalent du son pour la vue. En plus, il faut bien tourner la tête pour voir, donc l'œil envoie bien quelque chose.

L'argument de Camille semble commandé par un raisonnement que nous avons identifié précédemment dans lequel l'élève se considère comme source de causalité par ses propres actions³³⁵. Pour Camille, la cause de la vue est liée à une action qu'elle effectue : celle de tourner la tête. Par conséquent, si pour voir un objet il est nécessaire de tourner la tête vers lui, c'est donc que l'œil est actif dans le processus de la vision, ce qui, du point de vue physio-psychique, est tout à fait exact.

Tous les élèves ayant changé d'avis sur le sens de la vue paraissent convaincus du bien-fondé du raisonnement de Salviati, mais ils se trouvent confrontés à la difficulté d'identifier l'entité censée pénétrer l'œil. Annabelle (binôme 1) pose explicitement la question : « Je crois que c'est quelque chose qui entre dans l'œil, mais quoi ? Ça doit être quelque chose qu'on ne connaît pas encore », de même que Charles (binôme 2), qui cherche un équivalent du son pour la vision comme en témoigne cet extrait d'entretien :

Charles : ...moi je comprends pour ce qu'on entend, c'est les sons, mais // **mais pour la vue alors là // je vois pas ce que c'est.**
 Prof : Ce que c'est quoi ?
 Charles : Ben le truc qu'on voit, qui entre dans l'œil. Dans les oreilles c'est le son.

Kevin (binôme 6) rejoint alors l'interprétation initialement formulée par son camarade :

³³⁴ Annabelle (binôme 1), Charles (binôme 2), Océane (binôme 3) et Kevin (binôme 6).

³³⁵ Voir première partie.

- Florestan : Il [Salviati] dit que la vue est une // C'est où déjà, // une passion. Il parle de l'oreille qui reçoit, du nez et il pense que l'œil fait pareil.
- Prof : Et vous êtes d'accord ?
- Kevin : Je sais pas, ce serait logique pourtant. C'est peut-être **une image qui part de l'objet...**
- Florestan : Mais non, il dit dans le texte qu'il y en a qui sont trop grandes.

La remarque de Simplicio conduit Florestan à remettre en cause son hypothèse de départ : si la vision s'expliquait par l'arrivée d'une image dans l'œil, celle des objets de grande taille serait impossible. Ce raisonnement conduit Océane (binôme 3) à rejeter d'emblée l'idée de l'émission d'une image :

Ça [la vision] doit marcher comme le son. Il y a un truc qui rentre dans l'œil. Mais en tout cas, c'est pas une image. Ils le disent là, dans le texte.

C'est ce même argument qu'Etienne (binôme 5) oppose à Julie, convaincue elle aussi du fait que la vision s'explique par l'entrée d'une image dans l'œil :

- Julie : Moi je pense toujours que c'est une image.
- Etienne : Mais non, tu vois bien ce qu'ils disent, là // Les objets immenses, tout ça, comment ils font pour rentrer dans l'œil ?
- Julie : Eh ben, ce sont les images qui sont diminuées et qui sont agrandies après dans le cerveau.

Pour Alexis (binôme 4), qui au début de l'entretien semblait n'avoir aucune idée du mécanisme de la vision, les objets envoient un « flash » :

- Prof : Est-ce que vous pensez par exemple que tous les sens fonctionnent de la même façon ?
- Pierre : Oui.
- Alexis : Oui.
- Prof : Vous pouvez alors essayer d'expliquer comment fonctionne la vue ?
- Pierre : C'est comme pour l'oreille // L'œil il doit capter quelque chose.
- Alexis : Ça doit être comme un flash.
- Prof : Un flash.
- Alexis : Oui, **un flash que l'objet nous envoie** et après on peut voir.

Là encore, la comparaison avec le sens de l'ouïe permet à Pierre de reconnaître que la vue est une passion, et à Alexis de se prononcer sur la nature de l'entité émise par l'objet. Pour lui, il s'agit d'une sorte de « flash ». Cette réponse pourrait paraître assez proche de l'idée selon laquelle de la lumière serait envoyée par l'objet. Mais lorsque nous demandons à Alexis de préciser ce qu'il entend par « flash », il répond que ce doit être la « forme » ou la « couleur » de l'objet. En fait, un élève cite la lumière comme pouvant jouer le rôle de médiateur entre l'objet et l'œil : Thomas avaient tout d'abord évoqué l'idée d'un « truc » envoyé par les objets vers l'œil (voir Figure 42). La discussion avec Océane le conduit à en préciser la nature :

- Océane : ...Il y a un truc qui rentre dans l'œil. Mais en tout cas, c'est pas une image. Ils le disent là, dans le texte.

Thomas : **C'est la lumière.**
 Prof : La lumière.
 Thomas : Ben oui, **peut-être que les objets qu'on voit reflètent la lumière...**
 Prof : ...Vous pensez que les objets renvoient de la lumière à l'œil, c'est ça ?
 Océane : Ben non, pas tout le temps.
 Prof : Pas tout le temps.
 Océane : Non, là les objets ils n'envoient pas de lumière, sinon je le sentirais.
 Prof : Comment ?
 Océane : Ben, ça me ferait mal aux yeux, et là j'ai pas mal aux yeux.

L'hypothèse que la lumière puisse être le médiateur entre l'objet et l'œil ne convient pas à Océane, qui comme Julie lors de la phase précédente, affirme que l'entrée de lumière dans l'œil s'accompagne nécessairement d'une gêne (ici, il est question d'une douleur).

A l'issue de cette deuxième phase de l'entretien, 11 élèves (sur les 12 interrogés) semblent convaincus que la vision d'un objet résulte de l'action sur l'œil d'un agent extérieur provenant de cet objet. Le début du *Dialogue* a conforté les élèves qui avaient émis l'hypothèse d'un fonctionnement de la vue dans le sens objet → œil, et a convaincu la quasi totalité de ceux qui avançaient l'idée d'une émission depuis l'œil. L'analyse de cette deuxième phase d'entretien nous permet de penser que l'argument selon lequel les sens fonctionnent tous selon une modalité fondée sur la passion conduit les élèves à envisager la vision dans un sens objet → œil. Et même si l'identification du *stimulus* demeure très difficile, elle passionne tous les élèves.

3^e phase : la sensation d'éblouissement

La deuxième phase de l'entretien s'achève donc sur la question de l'entité qui, partant des objets, entre dans l'œil. Nous proposons aux élèves de lire la réplique de Salviati depuis « ...nous avons la sensation du goût... » jusqu'à « ... pendant dix secondes ? » (repères B à C), et de répondre à la question posée par Salviati.

Tous les élèves répondent que regarder le Soleil est insoutenable et dangereux. Certains associent la sensation d'éblouissement au simple fait de l'entrée de la lumière du Soleil dans les yeux. Pour Kevin (binôme 6), il est impossible de regarder fixement le Soleil car dans ce cas, « la lumière vient dans nos yeux ». En revanche, dans trois binômes les raisons invoquées rendent explicitement compte de l'excès de lumière qui arrive alors dans l'œil. Thomas (binôme 3) parle d'un « **surplus** de lumière sur la rétine ». Ces réponses laissent entrevoir les prémices d'un raisonnement quantitatif, comme en témoigne cet échange entre Etienne et Julie (binôme 5) :

- Prof : Alors, à votre avis, est ce qu'on peut regarder le Soleil fixement pendant 10 secondes ?
- Etienne : Non, on est ébloui.
- Prof : Pourquoi ? Vous ?
- Julie : Ben, parce qu'il y a **trop** de lumière qui arrive.

La situation expérimentale évoquée par Salviati amène Camille (binôme 1) sur une voie tout à fait inattendue. Rappelons qu'à ce moment de l'entretien, Camille est la seule à soutenir que la vue s'effectue dans un sens œil→objet. Selon elle, le fait d'avoir à tourner la tête pour voir implique que l'œil est actif dans le processus de la vision. A la question posée par Salviati, Camille répond qu'il n'est pas possible de regarder le Soleil car dans ce cas « la lumière entre dans les yeux ». Au moment où elle prononce cette phrase, elle réalise que la lumière peut avoir un effet sur l'œil qui n'est pas nécessairement caractérisé par une gêne. Pour Camille, l'entrée de la lumière dans les yeux entraîne également une modification de la forme de la pupille (celle des humains, mais également celle des chats) :

- Prof : Alors, vous pouvez regarder fixement le Soleil pendant 10 secondes ?
- Camille : Non.
- Annabelle : Non.
- Prof : Pourquoi ?
- Camille : Parce que la lumière elle vient dans nos yeux. Ah, mais je crois que j'ai compris, ça vient dans l'œil et notre truc, là, au milieu...
- Prof : La pupille.
- Camille : Oui, la pupille, elle rapetisse // Mais alors, c'est la lumière qui entre dans nos yeux ! C'est pour ça que les chats ils ont une toute petite pupille dans la journée, pour pas qu'il y ait **trop** de lumière qui entre dans l'œil.

Nous ne savons pas si la lumière dont parle Camille provient des objets qui l'entourent, ou s'il s'agit de la lumière présente sous la forme d'un « bain » au sens défini par Edith Guesne³³⁶. Mais ce qui semble clair c'est qu'elle associe le changement de forme de la pupille à la quantité de lumière qui pénètre l'œil. Nous proposons alors à Camille et à Annabelle une rapide expérience. Nous les plaçons face à face en leur demandant d'observer attentivement l'une de leurs pupilles. Nous allumons une petite lampe de poche près de leur visage, et nous les invitons à commenter ce qu'elles constatent :

- Prof : Alors ? Qu'avez-vous observé ?
- Annabelle : Sa pupille elle est devenue plus petite, juste après, quand vous avez allumé la lampe.
- Prof : Pourquoi ?
- Camille : Parce qu'il y avait **trop** de lumière d'un coup.
- Annabelle : La lumière elle agresse l'œil et l'œil se referme.

³³⁶ Le « bain de lumière » représente en fait la lumière ambiante, celle du jour. Voir Guesne, Les conceptions des enfants sur la lumière, op. cit. p. 18.

- Camille : Mais ce qui est bizarre c'est que **la lumière était sur le côté et je la voyais pas spécialement et ma pupille elle a changé.**
- Prof : Et alors ?
- Camille : Eh ben, ça veut dire que la lumière elle rentrait dans l'œil alors que je la voyais pas. Peut être que c'est comme ça, **elle rentre et on le sent pas**, mais nos yeux si.

Le fait que la pupille de Camille se rétracte alors qu'elle ne regarde pas la lampe, et qu'elle ne sent rien (aucune gêne, aucune sensation d'éblouissement) la conduit à se demander si la lumière n'entre pas continuellement dans ses yeux sans qu'elle s'en rende compte. Il nous semble que Camille franchit seule une étape importante en associant l'entrée de la lumière dans l'œil non pas à la sensation d'éblouissement, mais à une modification morphologique de la partie photorégulatrice de l'œil.

En outre, nous remarquons que Camille utilise le terme « lumière » dans deux sens bien distincts l'un de l'autre. Dans la phrase « la **lumière** était sur le côté et je la voyais pas spécialement », nous pensons que le terme « lumière » désigne la source lumineuse, c'est-à-dire ici la petite lampe de poche³³⁷. En revanche, lorsque Camille affirme que « la **lumière** rentrait dans l'œil » alors qu'elle ne la voit pas, le terme « lumière » renvoie à une entité invisible, une construction de l'esprit qui se distingue nettement de l'acception commune du mot « lumière ». Camille réalise ici un premier saut conceptuel particulièrement délicat : passer d'une « lumière » qui « se voit » à une *lumière* conceptualisée qui demeure invisible. Dans les propos de Camille le terme « lumière » possède deux significations différentes dont l'une se rapproche de celle que nous entendons faire construire aux élèves.

Malgré tout, il nous paraît nécessaire de signaler que nous ignorons, à ce moment de l'entretien, si Camille fait le lien entre l'entrée de la lumière dans l'œil et la vision : Pour Camille la *lumière* est une entité invisible, mais n'est sans doute pas encore le médiateur de la vue. C'est ce lien qu'il s'agit maintenant de construire avec les élèves.

³³⁷ La tendance des enfants à désigner les sources lumineuses par le terme « lumière » est une difficulté mise en évidence par Guesne (voir Guesne E. Les conceptions des enfants sur la lumière, op. cit.) et signalée par les programmes du cycle III de l'école élémentaire.

4^e phase : Peut-on être ébloui par des objets ordinaires ?

Nous leur demandons ensuite s'ils pensent pouvoir être éblouis par un objet et de décrire ce qui se passe alors. Nous entendons mettre en évidence, dans les raisonnements des élèves, l'existence subjective d'un seuil à partir duquel la lumière « resterait » sur l'objet vu. Cela signifierait que la diffusion n'est pas perçue comme un phénomène associé à l'éclairement. A la question « Pensez-vous pouvoir être ébloui par un objet ? », la plupart des élèves répond que c'est possible à condition que l'objet soit un miroir ou qu'il soit très fortement éclairé. Alexis (binôme 4) illustre sa réponse par un exemple :

Prof : Est-ce que, à votre avis, on peut être ébloui par un objet ?
 Alexis : Je peux prendre un exemple ?
 Prof : Bien sûr.
 Alexis : Eh ben, la nuit, si une voiture éclaire la bâche d'un camion, celle-ci nous éblouit.
 Prof : Mmm... Et pourquoi la bâche nous éblouit-elle ?
 Alexis : Parce que la lumière elle tape sur la bâche, et si elle est bien puissante, elle // rebondit et elle éblouit. Elle rentre dans les yeux.

Pour Alexis, on est ébloui car la lumière « rebondit » sur l'objet et blesse l'œil. C'est également l'avis de Camille pour qui « la lumière vient sur l'objet, rebondit et agresse l'œil ». Pour Julie (binôme 5) en revanche, il n'est pas envisageable d'être ébloui par les objets. Cela la conduit à s'opposer à nouveau à Etienne :

Prof : Est-ce que vous pensez que vous pourriez être éblouis par n'importe quel objet ?
 Julie : Par un miroir ?
 Etienne : Pas seulement. Par tout objet dont le taux de réfléchissement est assez fort.
 Prof : C'est-à-dire ?
 Etienne : Ben, chaque objet peut renvoyer plus ou moins de lumière. Ça dépend de son taux de réfléchissement. Là, par exemple mon pull, il peut m'éblouir si la source est très forte.
 Julie : Ton pull ?
 Prof : Vous n'êtes pas d'accord ?
 Julie : Ben non, je vois pas comment son pull il peut m'éblouir.
 Etienne : Si, si on l'éclaire avec une source très puissante.

Conformément à ce que nous supposions, la majorité des élèves interrogés associent l'entrée de lumière dans l'œil à la sensation d'éblouissement. Pour ces élèves, le renvoi de la lumière par les objets est reconnu dans les situations où les objets aveuglent. Dans ces cas-là, la lumière est tellement « forte » qu'elle rebondit sur les objets. Autrement dit, il existe chez certains élèves un seuil à partir duquel la lumière n'est pas renvoyée par les objets, et ce seuil est déterminé par la seule perception sensorielle (le fait de ne plus être ébloui). Ces raisonnements rappellent ceux des élèves de maternelle que nous avons présentés en première partie. Huit élèves (sur les 12 interrogés) disent que le moment où l'éblouissement cesse

correspond au moment où la lumière « reste » sur l'objet³³⁸. C'est le cas notamment de Kevin et de Florestan (binôme 6) :

- Prof : A votre avis, est-ce que à part le Soleil, on peut être ébloui / par exemple, par un objet ? Est-ce que vous pourriez être éblouis par ce stylo, là ?
 Florestan : Si la lumière est très forte, elle peut se refléter // Elle se reflète sur le stylo et elle entre dans l'œil, et on est ébloui.
 Prof : Et à partir de quand on n'est plus ébloui ?
 Florestan : Quand la lumière elle se reflète plus.
 Kevin : **Elle reste.**
 Prof : Elle reste où ?
 Kevin : Là, sur les objets.
 Prof : Est-ce que vous pensez qu'il y a de la lumière sur tous les objets ici ?
 Florestan : Oui.
 Kevin : Oui.
 Prof : Comment vous le savez ?
 Kevin : Ben sinon on les verrait pas. Il faut bien de la lumière.
 Prof : Et ces objets, ils vous renvoient de la lumière ?
 Florestan : Non.
 Kevin : Je suis d'accord.

Pour ces élèves, le moment où la sensation d'éblouissement disparaît correspond au seuil à partir duquel la lumière ne rentre plus dans l'œil. Celui-ci coïncide, selon eux, avec le moment où les objets ne renvoient plus de lumière.

Quatre élèves soutiennent l'idée opposée³³⁹. Pour eux les objets renvoient continuellement la lumière qu'ils reçoivent sans que l'on s'en rende compte. Ainsi pour Charles (binôme 2) : « **la lumière elle repart toujours mais on s'en rend pas compte**, c'est comme si elle ne repartait pas, c'est très faible ». Là encore, nous n'avons pas les moyens de savoir si Charles fait le lien entre la vision et l'entrée de la lumière dans l'œil (Nous avons fait une remarque identique à propos de l'explication de Camille). En revanche un tel lien paraît envisageable dans le raisonnement de Thomas (binôme 3) puisque celui-ci avait imaginé, lors de la phase précédente, que la lumière pouvait être le *stimulus* de la vue. Mais cette idée ne convient toujours pas à Océane :

- Prof : Pourquoi êtes-vous éblouis ?
 Océane : Parce que la lumière arrive dans les yeux.
 Thomas : Elle arrive de toute façon, mais, là, il y en a trop.
 Océane : Non elle arrive pas de toute façon.
 Prof : Pourquoi ?

³³⁸ Il s'agit d'Annabelle (binôme 1), de Morgane (binôme 2), d'Océane (binôme 3), de Pierre et Alexis (binôme 4), de Julie (binôme 5) et de Kevin et Florestan (binôme 6).

³³⁹ Il s'agit de Camille (binôme 1), de Charles (binôme 2), de Thomas (binôme 3) et d'Etienne (binôme 5).

Océane : Parce que s'il n'y en a pas assez, elle vient pas jusqu'aux yeux, elle reste là, sur la table, comme maintenant. Vous voyez bien la lumière là !
Prof : Et depuis cet endroit éclairé, il n'y a pas de lumière qui entre dans l'œil ?
Océane : Non.
Thomas : Si, mais on la sent pas. Mais tant qu'il y a de la lumière, ça se reflète. Il n'y a que quand on voit rien que la lumière se reflète plus.

En réalité, le lien entre lumière et vision n'est explicitement évoqué que par Etienne (binôme 5) qui prend en charge de convaincre Julie grâce à une explication tout à fait remarquable. Etienne fait lui aussi appel à la modification de la forme de la pupille ; il accompagne son raisonnement d'un dessin. Sa démarche s'appuie sur un raisonnement dans lequel la lumière est traitée de façon quantitative. Au bout de quelques minutes, Julie semble accepter la théorie de son camarade :

Prof : Vous pensez que sur cette table, là, il y a de la lumière ?
Julie : Oui.
Prof : Et vous pensez que cette lumière arrive dans vos yeux ?
Julie : Non, elle reste. Elle est pas assez forte.
Etienne : Excusez-moi, je peux faire un dessin pour lui expliquer // avec la pupille.
Etienne : Là, tu vois, cet objet renvoie beaucoup de lumière à cause de son taux de réfléchissement. Et la pupille de l'œil elle devient petite [voir dessin n°1 Figure 44] // Là, il y a un autre objet, il renvoie moins de lumière. Son taux de réfléchissement est plus faible. Mais la lumière elle repart quand même, tu vois // Dès qu'elle arrive, elle repart. Mais moins. Tu comprends, la lumière c'est ce qui permet de voir les objets alors elle continue à rentrer dans l'œil, sinon, on ne verrait rien. Mais du coup, l'œil s'adapte. C'est pour ça / tu vois, ici, la pupille est plus grande [voir dessin n°2 Figure 44].
Julie : C'est comme pour les chats ?
Etienne : Non, pour les chats c'est pire. Eux ils peuvent capter beaucoup plus de lumière que nous. C'est pour ça qu'on dit qu'ils voient la nuit. En fait, la nuit il y a toujours un peu de lumière et ça leur suffit.
Julie : Ah ! d'accord / Je crois que je comprends.

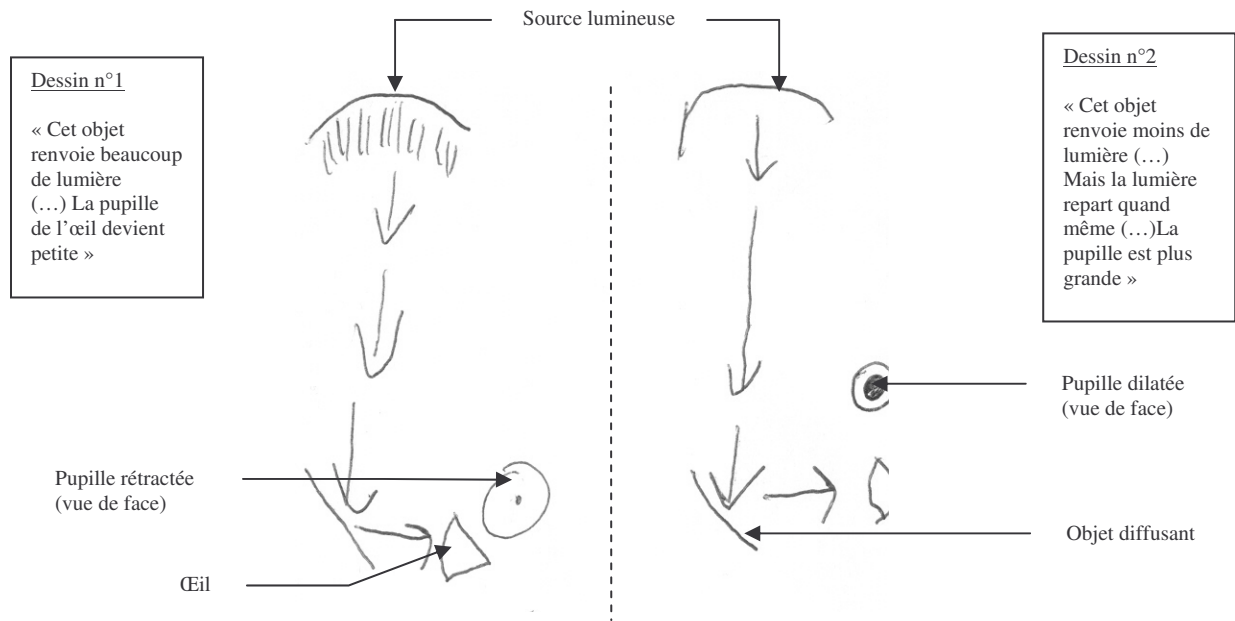


Figure 44 : Dessin d'Etienne. Les flèches représentent le trajet de la lumière diffusée par l'objet. Elle arrive en quantité importante dans l'œil du dessin n°1 et en faible quantité dans l'œil du dessin n°2.

A l'issue de cette quatrième phase, deux élèves (Etienne et Thomas) interprètent la vision de façon conforme à nos attentes. Même si elle n'en est pas à l'initiative, Julie semble néanmoins convaincue par l'explication d'Etienne. Deux autres élèves (Camille et Charles) disent que les objets éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent sans subordonner ce phénomène à une sensation de gêne ou d'éblouissement, mais nous ignorons si ces élèves font le lien entre la vision des objets et l'envoi de la lumière par les objets dans l'œil de l'observateur. En outre, parmi ces quatre élèves (Etienne, Thomas, Camille et Charles), deux (Camille et Etienne) appuient spontanément leur raisonnement sur un argument biologique lié au fonctionnement de la pupille. Pour ces élèves, le fait que la pupille se dilate dans des conditions de faible luminosité indique que la lumière pénètre l'œil même lorsqu'elle est faible et qu'elle ne provoque aucune gêne. Les huit autres élèves (c'est-à-dire la grande majorité) admettent que les objets renvoient la lumière uniquement lorsque celle-ci est suffisamment forte pour « rebondir ». Dans ce cas, elle pénètre l'œil de l'observateur qui est alors ébloui. L'entrée de la lumière dans l'œil serait, pour ces élèves, un facteur limitant pour la vue. Enfin, nous constatons que les échanges internes aux binômes permettent à certains élèves de modifier leur opinion, sans que nous ayons à intervenir.

5^e phase : Raisonnement par analogie, le sens de l'ouïe

Nous rappelons aux élèves que nous cherchons à comprendre comment fonctionne la vision. Puis nous les invitons à poursuivre la lecture du texte, depuis « Quelle idée ! » jusqu'à « ...provoque l'ouïe » (repères C à D). Nous souhaitons mesurer les effets d'une analogie avec le mécanisme de l'ouïe. La deuxième phase de l'entretien nous a permis de constater que le rapprochement entre la vue et l'ouïe semblait poser quelques difficultés aux élèves. Certains parmi eux avaient notamment souligné qu'il leur paraissait difficile de trouver un équivalent du son pour la vue. Pour Charles (binôme2), « ce qui entre dans les oreilles c'est le son », et c'est précisément ce son que l'on entend. Or dans le cas de la vision d'un objet, ce qui entre dans l'œil ce n'est pas ce que l'on voit puisque ce que l'on voit c'est l'objet. Kevin et Florestan (binôme 6) paraissent sensibles à l'analogie proposée par Salviati même s'ils expriment une réserve proche de celle de Charles :

- Kevin : Ben en fait // En fait, c'est faux ce qu'on a dit avant.
 Prof : Comment ça ?
 Kevin : Ben, les objets ils envoient toujours de la lumière, et c'est ça qui permet de voir.
 Prof : Et on n'est pas ébloui alors ?
 Florestan : Non, c'est une question de quantité / de quantité.
 Prof : Expliquez-moi ça.
 Florestan : Ben la vision // la vision, c'est quand de la lumière entre dans l'œil, mais pas trop. C'est un juste milieu.
 Kevin : Mais, quand même, ce qui est bizarre c'est **qu'on s'en rend pas compte, alors que pour le son, on l'entend, mais la lumière, on la voit pas.**

L'analogie avec le sens de l'ouïe conduit Kevin et Florestan à proposer une explication du mécanisme de la vision conforme à nos attentes, dans laquelle la lumière est traitée de façon quantitative : « C'est une question de quantité » confirme Florestan. Il semble que pour ces deux élèves l'entrée de la lumière dans l'œil ne soit plus considérée comme la cause de l'éblouissement mais comme la cause de la vision. Kevin revient sur ces précédentes assertions —« les objets ne renvoient pas la lumière »— pour finalement affirmer que « les objets envoient toujours de la lumière » et que « c'est ça qui permet de voir ». Il réalise que cette interprétation « bizarre » demande un certain effort d'imagination : « on s'en rend pas compte », puisque le son n'est pas comparable à la lumière : « **le son on l'entend, mais la lumière on la voit pas** ». La *lumière* dont il est question ici ne désigne ni les sources ni les impacts lumineux, c'est-à-dire, la « lumière qui se voit ». A son tour, Kevin affirme que la

lumière est une entité invisible. Il accomplit un effort conceptuel identique à celui réalisé par Camille (binôme 1) avant lui³⁴⁰.

Quant à Charles (binôme 2) qui affirmait que « la lumière arrive toujours [des objets] mais que l'on ne s'en rend pas compte », il émet timidement l'hypothèse que la vision « c'est peut-être la lumière qui part des objets et qui fait voir l'image ».

A l'issue de cette période de lecture, Kevin, Florestan et Charles construisent une nouvelle idée de la lumière et de la vision, en rupture avec leurs représentations initiales. Ils réalisent ainsi le saut conceptuel nécessaire à l'interprétation rationnelle du mécanisme optique de la vision. De même en est-il pour Pierre et Alexis (binôme 4) :

Pierre : Ben en fait, on voit quand c'est moyen.
 Prof : Quand c'est moyen ? C'est-à-dire ?
 Pierre : Et ben, il faut juste ce qu'il faut de lumière.
 Alexis : Mais c'est pas pareil que ce qu'on a dit avant. En fait, **la lumière, elle rentre toujours dans les yeux quand on voit. C'est juste qu'elle rentre moins.** Du coup, on la sent pas.

Là encore, l'analogie avec le sens de l'ouïe conduit Pierre et Alexis à traiter la lumière de façon quantitative pour construire un modèle de la vision rationnellement acceptable. C'est une démarche identique qui permet à Océane (binôme 3) de rejoindre l'opinion de son camarade :

Océane : Ca y est, moi j'ai compris maintenant.
 Prof : Qu'est-ce que vous avez compris ?
 Océane : Eh ben, il a raison, on sent pas la lumière, mais elle rentre dans l'œil quand même. C'est juste qu'il faut pas qu'il y en ait trop pour voir. **C'est une question de quantité.**
 Thomas : Tu vois !

En revanche, la comparaison proposée par Salviati ne convainc ni les élèves du binôme 1 et ni Morgane (binôme 2) comme nous pouvons le constater dans cet extrait de conversation entre Camille et Annabelle (binôme 1) :

Camille : Moi je crois pas que la lumière modérée ça fait la vue.
 Prof : Mais vous êtes toujours d'accord pour dire que les objets envoient la lumière qu'ils reçoivent même quand on s'en rend pas compte ?
 Camille : Oui mais // c'est pas ça qui fait voir les objets.
 Prof : Pourquoi ?

³⁴⁰ Rappelons que la polysémie du terme « lumière » est une difficulté majeure de la compréhension et de l'enseignement du mécanisme optique de la vision.

- Camille : Si on compare avec le son, comme il fait lui, Salviati, c'est pas pareil. Le son c'est ça qu'on entend.
Annabelle : Il faudrait que les objets entrent dans les yeux, ou leur image.

Et ce qui paraît surprenant c'est que Camille (binôme 1) avait accepté l'idée du renvoi systématique de la lumière par les objets ordinairement éclairés, en étendant le lien de causalité qui unissait de façon exclusive l'entrée de la lumière dans l'œil et la sensation d'éblouissement, à la vision. Nous pensions, à tort, que cette étape serait suffisante pour lui permettre de faire de la lumière le *stimulus* de la vue.

A l'issue de cette cinquième phase d'entretien, neuf élèves (sur les douze concernés par notre expérimentation) reconnaissent que la lumière est le *stimulus* de la vue. L'analogie avec le sens de l'ouïe paraît les orienter vers un raisonnement dans lequel la lumière est traitée de façon quantitative. La diffusion devient pour ces élèves un phénomène associé à l'éclairement et non une conséquence de la grande quantité de lumière qui atteint l'objet. La majorité des élèves remet en cause l'idée de l'existence d'un seuil commandé par une sensation d'éblouissement en-deçà duquel la lumière ne serait plus renvoyée par les objets. L'éblouissement et l'entrée de la lumière dans l'œil deviennent des faits pouvant être dissociés. Le Tableau 11 rend compte de l'évolution des raisonnements des élèves au cours des cinq phases que nous venons de présenter. Seule la phase n°4 est exclue de notre tableau car elle n'avait pas pour objectif de faire produire aux élèves une explication de la vision.

	Binôme 1 Annabelle et Camille	Binôme 2 Charles et Morgane	Binôme 3 Océane et Thomas	Binôme 4 Pierre et Alexis	Binôme 5 Etienne et Julien	Binôme 6 Kevin et Florestan
Explication spontanée du mécanisme de la vision	Camille : œil→objet vision Annabelle : œil→objet regard Pas de Polémique	Charles : œil→objet radar Morgane : objet→œil image Polémique	Océane : œil→objet vision Thomas : objet→œil truc Polémique	Pierre : Pas de réponse Alexis : Pas de réponse	Etienne : objet→œil lumière Julie : objet→œil image Polémique autour de la nature de l'entité	Kevin : œil→objet radar Florestan : objet→œil image Polémique
Explication après l'argument de l'unité de fonctionnement des 5 sens.	Camille : œil→objet vision Annabelle : objet→œil ??	Charles : objet→œil ?? Morgane : objet→œil ??	Océane : objet→œil ?? Thomas : objet→œil lumière	Pierre : objet→œil Forme Alexis : objet→œil Flash, couleur	Etienne : objet→œil lumière Julie : objet→œil image	Kevin : objet→œil ?? Florestan : objet→œil Image
Explication après l'expérience de pensée de l'éblouissement	Camille : objet→œil ?? Annabelle : objet→œil ??	Charles : objet→œil ?? Morgane : objet→œil ??	Océane : objet→œil ?? Thomas : objet→œil lumière	Pierre : objet→œil Forme Alexis : objet→œil Flash, couleur	Etienne : objet→œil lumière Julie : objet→œil image	Kevin : objet→œil ?? Florestan : objet→œil Image
Explication après l'analogie avec le sens de l'ouïe	Camille : objet→œil ?? Annabelle : objet→œil ??	Charles : objet→œil lumière Morgane : objet→œil ??	Océane : objet→œil lumière Thomas : objet→œil lumière	Pierre : objet→œil lumière Alexis : objet→œil Lumière	Etienne : objet→œil lumière Julie : objet→œil lumière	Kevin : objet→œil lumière Florestan : objet→œil Lumière

Tableau 11 : Synthèse de l'évolution des raisonnements des élèves à propos du mécanisme de la vision. Les zones grisées désignent les élèves qui expliquent la vision de façon satisfaisante. Les noms en gras désignent les élèves qui expliquent la vision dans un sens objet→œil.

6^e phase : Explication rationnelle du mécanisme optique de la vision

Les entretiens se poursuivent par une dernière étape de lecture. Nous invitons les élèves à lire le texte jusqu'à la fin (depuis « Si je comprends bien... » jusqu'à « ...je suis séduit par votre théorie », repères D à E). Suite à cette lecture, nous leur demandons ce qu'ils pensent du raisonnement de Salviati. Tous les élèves qui, à l'issue de la phase précédente, expliquaient la vision de façon satisfaisante voient leur opinion confortée par les propos de Salviati, ce qui ne manque d'enthousiasmer un certain nombre d'entre eux. C'est le cas notamment de Charles (binôme 2), dont l'interprétation ne semblait auparavant pas très assurée :

Prof : Alors, qu'est ce que vous avez compris.
Morgane : Ben en fait...

- Charles : C'est exactement ce que j'ai expliqué.
 Prof : Oui, c'est à dire ?
 Charles : **La lumière elle éclaire l'objet. Après, l'objet renvoie la lumière dans nos yeux. Quand il y en a trop qui arrive, on est ébloui, et quand il y en a juste ce qu'il faut, on voit bien. Et quand il y en a pas du tout, on voit rien.**
 Morgane : C'est comme dans la phrase.
 Prof : Laquelle ?
 Morgane : Euh, attendez // « L'homme voit lorsque la quantité de lumière provenant des objets et qui pénètre son œil n'est ni trop forte, ni trop faible ».
 Prof : Et vous êtes d'accord ?
 Morgane : Oui.

Cette conversation entre Morgane et Charles est intéressante pour plusieurs raisons. D'abord, l'explication de Charles est tout à fait remarquable. La lumière, traitée de façon quantitative, est considérée comme le *stimulus* de la vue, et le moment où elle n'arrive plus dans l'œil correspond au moment où la vision est impossible. Ensuite, Morgane intervient pour rapprocher les propos de Charles à ceux de Salviati en citant le passage du *Dialogue* concerné, et paraît convaincue à la fois par son camarade et par le texte. Deux autres élèves (Océane binôme 3 et Julie binôme 5) font spontanément référence au texte pour souligner la justesse et la valeur de leur propre interprétation en référence à celle de Salviati :

- Prof : Alors ?
 Etienne : Eh ben c'est ce que j'ai dit.
 Julie : Oui, moi aussi, j'ai compris maintenant.
 Prof : Et qu'est ce que vous avez compris ?
 Julie : Que pour voir, il faut de la lumière // attendez, **il y a une phrase dans le texte où ils expliquent** / là : « L'œil voit lorsque la quantité de lumière provenant des objets n'est ni trop forte ni trop faible ».

Annabelle et Camille semblent cette fois convaincues par l'explication de Salviati. Elles expriment le souhait de reprendre leur dessin (voir Figure 43) afin d'y apporter quelques modifications (voir Figure 45).

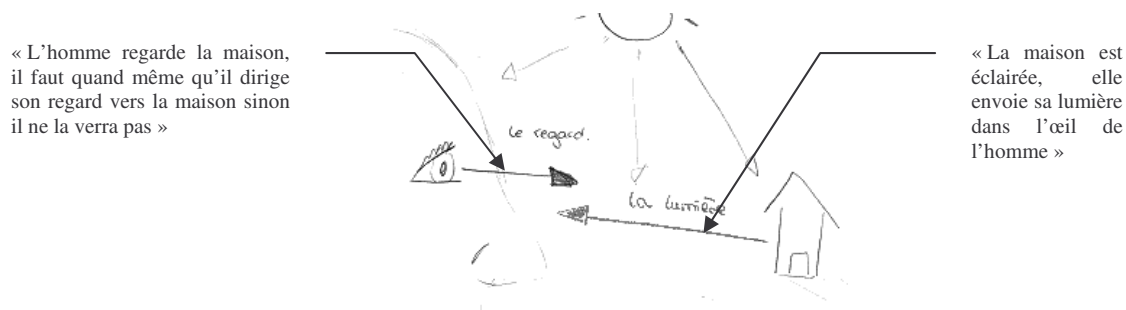


Figure 45 : Dessin de Camille et Annabelle (binôme 1) rectifié à l'issue de la lecture intégrale du *Dialogue* et légendé par nos soins. Les commentaires reprennent ceux des élèves au moment où elles modifient leur dessin.

Il est remarquable que Camille n'aient pas souhaité biffer la flèche indiquant la direction du regard. Pour Annabelle, il est nécessaire que l'homme « dirige son regard vers la maison, sinon il ne la verra pas ». En effet, cette dimension physio-psychologique demeure essentielle dans l'acte de voir ainsi que nous l'avons montré en introduction.

Alors que la lecture du *Dialogue* s'achève, tous les élèves semblent admettre que la vision d'un objet nécessite l'envoi de lumière par cet objet dans les yeux de l'observateur. Cette sixième étape peut paraître plus transmissive que les précédentes puisque le modèle de la vision est présenté dans le texte par Salviati. Or si nous avons fait le choix d'une telle stratégie c'est que l'appropriation du modèle de la vision (et avec elle celle du concept de lumière) nécessite à un moment donné du processus d'apprentissage, la réalisation d'un saut conceptuel qui mérite d'être explicitement accompagné. Cependant, il nous semble important de rappeler que l'explication de Salviati est en fait, pour neuf des douze élèves interrogés, un support de vérification. En outre, il convient de signaler qu'elle n'est pas donnée d'emblée, mais qu'elle constitue l'issue d'un itinéraire cognitif dans lequel tous les élèves se sont engagés. Or, pour trois d'entre eux, ce cheminement n'a certes pas abouti à la formulation d'une interprétation de la vision satisfaisante, mais il leur a permis de s'investir dans une démarche de recherche, de formuler des hypothèses illustrées par un certain nombre d'expériences de pensée. Au bout du compte, ces élèves se sentent concernés par le problème du mécanisme de la vision, ce qui leur permet de s'approprier une nouvelle idée de la lumière et de la vision.

Les deux étapes qui vont suivre devraient nous donner quelques indications sur la capacité des élèves à transférer une connaissance nouvellement acquise d'une situation particulière (celle de la vision des objets ordinairement éclairés) à deux autres, celle de la vision nocturne du chat d'une part et celle des ombres, d'autre part.

7^e phase : La vision nocturne du chat

Certains élèves avaient évoqué la vision nocturne du chat avant même qu'il en soit question dans le *Dialogue*. Océane (binôme 3) affirme dès le début de l'entretien que le mécanisme de la vue des chats diffère de celui des humains :

Prof :	Qu'est ce qui vous semble important pour voir ?
Océane :	Les yeux // et un truc à regarder évidemment.
Prof :	Et c'est tout ?
Thomas :	Non, la lumière aussi.
Prof :	La lumière, vous pouvez m'expliquer ?

- Thomas : La lumière, c'est elle qui éclaire.
 Océane : Oui, et **les chats par exemple, ils ont une rétine qui renvoie de la lumière.**
 Prof : Qui renvoie la lumière ?
 Océane : **La lumière elle entre dans leurs yeux et après ils la renvoient.**
 Prof : Bon, et pour les hommes, c'est pareil ? Leurs yeux renvoient la lumière ?
 Océane : Non, sinon on verrait dans le noir.

Pour Océane, les chats voient dans la nuit car leurs yeux renvoient la lumière qu'ils reçoivent, alors que les hommes envoient « une vision » (voir plus haut Figure 41). A l'issue de l'entretien, Océane change d'avis sur la vision humaine mais elle maintient son interprétation de la vision nocturne du chat, rejoignant ainsi l'opinion de Kepler et de Descartes :

- Prof : Qu'est-ce que vous pensez de la vision des chats maintenant ?
 Océane : Non, pour le chat, c'est pas pareil que pour les humains parce que la lumière rentre le jour, **c'est comme une réserve que le chat utilise la nuit. D'ailleurs ses yeux brillent la nuit, comme des phares.**

Ses propos sont très proches de ceux de Kepler qui affirme que « des sources permanentes de lumière sont dans les yeux des chats »³⁴¹, mais également de ceux de Descartes :

Ainsi faut-il avouer que les objets de la vue peuvent être sentis, non seulement par le moyen de l'action qui, étant en eux tend vers les yeux ; mais aussi par le moyen de celle, qui étant dans les yeux, tend vers eux. Toutefois, pour ce que cette action n'est autre chose que la lumière, il faut remarquer qu'il n'y a que ceux qui peuvent voir la nuit, comme les chats, dans les yeux desquels elle se trouve³⁴².

Le système explicatif d'Océane s'adapte parfaitement au changement de forme de la pupille du chat illustré par la Figure 39. Océane interprète la dilatation de la pupille comme une nécessité : cela permet au chat de faire sortir davantage de lumière lorsqu'il fait noir, et « qu'il en a plus besoin ». En adoptant un raisonnement fondé sur un traitement quantitatif de la lumière, Océane parvient à une conclusion opposée à celle à laquelle nous souhaitions aboutir, ce qui n'est pas le cas d'Annabelle et de Camille (binôme 1) :

- Prof : Donc si j'ai des yeux, ça suffit pour voir ?
 Annabelle : Non, il faut aussi la lumière.
 Prof : Et elle sert à quoi cette lumière ?
 Annabelle : C'est pour éclairer. **On voit rien sinon dans le noir par exemple. On n'est pas des chats !**

³⁴¹ Kepler J. *Paralipomènes*, op. cit. chapitre V, p. 313.

³⁴² Descartes R. *Dioptrique*, p. 75. Voir également deuxième partie.

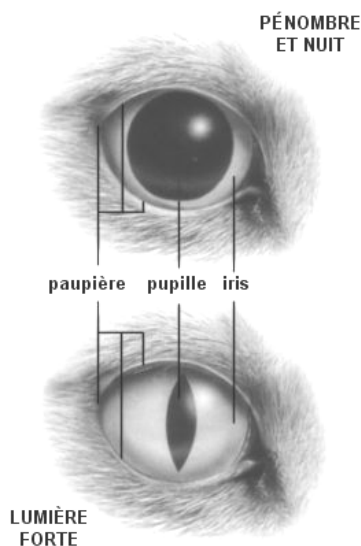
Annabelle et Camille (binôme 1) étaient également persuadées, au début de l'entretien, que les chats voyaient dans le noir, à la différence des humains. Mais la séance les conduit à modifier leur opinion de départ :

- Prof : Est-ce que vous pensez que c'est pareil pour les chats ? Vous en avez parlé tout à l'heure en disant que c'était pas pareil. Vous en pensez quoi ? Vous pouvez expliquer la vision du chat. C'est comme l'homme ou pas ?
- Camille : Ben oui, ça doit être pareil.
- Prof : Et les chats voient la nuit alors ?
- Annabelle : Oui, enfin, ça dépend quelle nuit. Si c'est tout noir, non, **il faut au moins qu'il y ait un peu de lumière pour que les yeux du chat la captent.**

Pierre reconnaît également avoir changé d'avis au cours de l'entretien :

- Prof : Vous pensez que les chats voient dans la nuit ?
- Pierre : **Moi, je pensais vraiment avant.** Mais en fait, je crois pas, c'est juste qu'ils captent la lumière même quand il n'y a pas beaucoup, c'est ça ?

A l'exception d'Océane, tous les élèves disent que les chats ne voient pas la nuit. Les raisons invoquées rendent compte du fait que dans une ambiance sombre la pupille de l'œil du chat se dilate de façon à y faire entrer une quantité maximale de lumière. Conformément à nos attentes, ils conçoivent la pupille comme un régulateur de quantité de lumière. L'extrait ci-dessous donne un aperçu des commentaires des élèves autour de la Figure 39.



- Prof : Qu'est-ce que vous pensez de la vision du chat ? On dit que les chats voient la nuit, non ?
- Kevin : Oui, mais peut-être que c'est jamais la nuit noire noire.
- Prof : Et ?
- Kevin : Et ils peuvent voir même avec un tout petit peu de lumière.
- Prof : Je vais vous montrer une photo [figure 3 ci-contre].
- Kevin : Ben voilà, tu vois
- Flor : Ouais, la // **la pupille, elle est toute grande, elle s'ouvre quand il y a un tout petit peu de lumière pour en capter un maximum.**
- Kevin : Et là, la pupille elle est petite parce que la quantité de lumière est trop grande.

Les élèves expliquent que lorsque l'on affirme que les chats voient la nuit cela signifie en réalité qu'ils voient lorsque qu'ils peuvent « capter » une très faible quantité de lumière. Si cette quantité paraît insuffisante pour les humains, il n'en est pas de même pour les chats, dont les pupilles deviennent « toute grandes ». Par conséquent, la « nuit » dont il est question

ne correspond jamais à l'obscurité totale, ou pour reprendre l'expression de Kevin (binôme 6), à une nuit « noire noire », ce qu'Etienne (binôme 5) résumait parfaitement en disant :

Eux [les chats] ils peuvent capter beaucoup plus de lumière que nous. C'est pour cela qu'on dit qu'ils voient dans la nuit. En fait, la nuit il y a toujours un peu de lumière et ça leur suffit.

Nous pouvons signaler que seul un élève précise l'origine de la lumière « captée » par les yeux du chats. Pour Thomas (binôme 3) la lumière qui pénètre l'œil du chat correspond à celle qui se trouve « sur » les objets :

La nuit, les chats ouvrent grand leur pupille et ils peuvent capter même une infime partie de lumière, et comme il y a toujours au moins un peu de lumière **sur les objets**, les moindres infimes morceaux de lumière suffisent.

En revanche, pas un élève n'indique explicitement que la lumière qui entre dans l'œil du chat est renvoyée par les objets.

Finalement, onze élèves (sur les douze participant à notre expérimentation) reconnaissent que le chat ne voit pas dans l'obscurité totale. Tous justifient leur réponse en associant la variation de la surface de la pupille de l'œil du chat à la quantité de lumière qui y pénètre, c'est-à-dire en adoptant un raisonnement fondé sur un traitement quantitatif de la lumière. Toutefois, il paraît important de noter que ces élèves (à l'exception de Thomas) ne précisent jamais que la lumière qui entre dans l'œil du chat provient des objets (plus ou moins éclairés). Enfin, nous remarquons également que c'est par un raisonnement quantitatif qu'une élève confirme que l'œil du chat émet sa propre lumière.

8^e phase : La vision des ombres

Nous montrons aux élèves la photographie de la fleur (voir Figure 40), et nous leur demandons d'expliquer les raisons pour lesquelles ils perçoivent derrière la fleur une zone foncée et une zone plus claire. La question que nous leur posons à chaque fois est : « pourquoi voyez-vous l'ombre derrière la fleur ? ». Ainsi que nous l'indiquions lors de la description du scénario de ces entretiens, nous nous attendons à ce qu'il soit très difficile pour les élèves de dire que l'ombre est visible car elle envoie vers l'œil moins de lumière que la zone qui l'entoure. Certains y parviennent pourtant avec une rigueur certaine. C'est le cas notamment de Pierre (binôme 4) :



- Prof : Qu'est ce que vous voyez ?
 Pierre : Une fleur, son ombre.
 Prof : Et pourquoi vous voyez une ombre ?
 Alexis : Parce qu'il y a moins de lumière.
 Prof : Moins, ça veut dire qu'il y en a un peu ?
 Pierre : Un peu mais moins, **ça renvoie moins de lumière dans l'œil. On fait la différence comme ça.**

La réponse de Pierre intègre tous les éléments constitutifs d'une explication du mécanisme optique de la vision telle que nous l'entendons : la lumière est traitée de façon quantitative, la diffusion est prise en compte, de même que l'entrée de la lumière dans l'œil de l'observateur³⁴³. Cette réponse nous paraît d'autant plus admirable que Pierre avait débuté l'entretien sans avoir aucune idée du mécanisme de la vision. Kevin (binôme 6) propose une explication un peu semblable : « Là, cette partie elle est **moins** éclairée, donc elle renvoie **moins** de lumière, et là plus ». Kevin adopte un raisonnement quantitatif, il y intègre le phénomène de la diffusion puisque la lumière est renvoyée, mais il ne précise pas si celle-ci pénètre ou non l'œil de l'observateur.

Tous les autres élèves parviennent à expliquer que la partie sombre correspond à une zone qui reçoit moins de lumière que la zone plus claire, mais ils ne précisent pas spontanément si la lumière est renvoyée. C'est le cas notamment de Camille (binôme 1) :

- Prof : Je vais vous montrer une photo // Sur cette photo, il y a deux zones au fond, là, vous voyez ? Elles sont différentes. Vous pouvez m'expliquer pourquoi vous voyez l'ombre de la fleur, ici ?
 Camille : Ben parce que c'est plus foncé.
 Prof : C'est-à-dire ?
 Camille : Parce qu'il y a **moins** de lumière qui arrive.

³⁴³ Considérer la *lumière* dans son acception physique d'entité invisible n'est pas un objectif explicite de notre séquence d'enseignement. En particulier, notre *Dialogue* n'est pas construit dans le but de parvenir à cette connaissance spécifique, il ne permet donc pas aux élèves de constater que la *lumière* est invisible. Toutefois, il est intéressant de souligner que certains élèves, Camille et Kevin notamment, affirment que la lumière « ne se voit pas », alors même que la question de la non-visibilité de la lumière ne leur est pas posée, et qu'elle ne fait pas l'objet d'un traitement spécifique dans notre séquence. La grande majorité des élèves affirme qu'ils ne « se rendent pas compte » que la lumière pénètre leurs yeux. On peut donc supposer qu'ils ne sont pas loin d'admettre que cette lumière qu'ils « ne sentent pas » est une chose invisible (même s'ils ne le disent pas explicitement). Afin d'affronter ce problème de l'invisibilité de la *lumière*, il nous semblerait pertinent d'associer à notre *Dialogue* une (ou des) situation(s) expérimentale(s) dans la(les)quelle(s) les élèves pourraient constater que des faisceaux lumineux sont invisibles « de profil ».

Mais lorsque l'on demande aux élèves si le mur placé dans cette zone de pénombre renvoie la lumière qu'il reçoit, tous admettent que c'est le cas, mais en moindre quantité, comme en témoigne cette réponse de Morgane (binôme 2) :

Prof :	Cette zone sombre que vous appelez une ombre, elle vous renvoie de la lumière ?
Morgane :	Un peu, peut-être, mais moins que autour, c'est pour ça que ça a pas la même couleur.

Or, rappelons qu'à l'issue de la quatrième phase des entretiens, la majorité des élèves (sept sur les douze interrogés), dont Morgane, affirmait que seuls les objets fortement éclairés étaient susceptibles de renvoyer la lumière. Il est déjà difficile pour le sens commun d'admettre que les objets ordinairement éclairés renvoient la lumière qu'ils reçoivent, mais la difficulté est accrue lorsqu'il s'agit d'objets très faiblement éclairés ou placés dans une zone de pénombre. Pourtant, c'est bien ce qui justifie que ces objets soient presque toujours visibles, même dans l'ombre³⁴⁴.

5.3. Bilan : Les élèves et le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*

L'objectif de cette dernière partie est de connaître l'avis des élèves sur le texte qu'il leur a été proposé. Nous leur avons simplement demandé si celui-ci leur avait semblé difficile, utile et pourquoi. Leurs réponses sont à la fois riches et variées. Elles peuvent faire l'objet d'un traitement thématique qui mettra en évidence certaines récurrences, même si les élèves ne se prononcent pas tous sur des sujets identiques.

5.3.1. La spécificité littéraire du texte

A l'exception d'Annabelle qui trouve le *Dialogue* « difficile », les élèves le jugent plutôt accessible. C'est le cas par exemple de Thomas (binôme 3) :

Prof :	Je voudrais avoir votre avis sur le texte. Vous pensez que c'est utile ce genre de texte ?
Thomas :	Ben oui, parce que / un dialogue, là comme ça, c'est plus facile à lire, c'est aéré et ça donne envie de lire. Et puis, ce texte, il est pas trop dur finalement.

³⁴⁴ Le problème de la vision des objets placés dans les zones d'ombre a été étudié par Wanda Kaminski. Kaminski W. *Optique sans lumière*, conférence donnée à l'occasion des 50^e Journées Nationales de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, Clermont-Ferrand, octobre 2002.

Prof : Finalement ?
 Thomas : Oui, parce que / au début, j'ai eu un peu peur que ce soit comme du français ancien, difficile à comprendre. Et en fait, ça va, c'était facile.

D'autres élèves apprécient, comme Thomas, le procédé littéraire utilisé, et disent préférer le *Dialogue* à d'autres types de textes habituellement utilisés en classe. Florestan (binôme 6) trouve le texte « moins ennuyeux que ceux de d'habitude parce que c'est une discussion ». C'est également l'avis d'Alexis et de Pierre (binôme 4) :

Prof : Qu'avez-vous pensé du texte ?
 Pierre : Ben **c'est plus intéressant comme ça qu'un cours normal**.
 Alexis : On préfère lire un cours comme ça qu'un paragraphe tout serré. Une discussion, c'est plus facile à lire qu'un paragraphe.

La réponse de Pierre « c'est plus intéressant comme ça qu'un cours normal » a de quoi nous surprendre. En effet, à l'issue de la première période de lecture nous lui avons demandé ce qu'il avait compris du texte, question à laquelle il avait répondu « rien, c'est difficile ». Etant donnée l'hétérogénéité des élèves interrogés, nous pensons que notre *Dialogue* est adapté à un public de quatrième, quel que soit son niveau, et que la forme littéraire utilisée est un facteur de motivation non négligeable.

5.3.2. La dimension cognitive et métacognitive

Certains élèves reconnaissent spontanément avoir appris quelque chose et avouent être troublés par le fait que ce savoir nouvellement acquis soit en opposition avec ce qu'ils pensaient initialement. Pour Annabelle (binôme 1) : « l'entretien est perturbant parce ce qu'on arrive avec une idée et on ressort avec une autre ».

Ce qui est intéressant c'est que lorsqu'on leur pose clairement la question ces élèves sont capables de préciser à quel moment de la lecture ou de l'entretien ils pensent avoir compris le mécanisme optique de la vision. Annabelle explique que « quand on sait que les sens fonctionnent de la même façon, ça aide ». Pierre (binôme 4) quant à lui affirme qu'il a compris « quand ils parlent de l'éblouissement ».

5.3.3. La dimension transdisciplinaire

Quelques élèves s'attachent à la dimension transdisciplinaire du *Dialogue*. Ils remarquent que celui-ci se trouve au carrefour de plusieurs disciplines, et présentent cet aspect comme un argument favorable ainsi que le montre ce commentaire d'Etienne (binôme 5) :

- Etienne : Moi je pense que un texte comme ça, **ça donne de la cohérence aux matières.**
- Prof : C'est-à-dire ?
- Etienne : Eh bien, ça fait un lien avec l'histoire-géo par exemple. Parce qu'on s'embrouille quand on change toujours de sujet.

A ce sujet, Florestan précise que ce type de support « pourrait être utilisé en français », et il ajoute que « ça changerait de faire de la physique en français ». Camille suggère quant à elle, qu'il pourrait être « intéressant d'étudier l'époque de la discussion en même temps en cours d'histoire ». Ces élèves semblent particulièrement sensibles au fait que le texte puisse potentiellement favoriser des liens entre certaines disciplines scolaires. Dans les pratiques pédagogiques courantes celles-ci sont plutôt disjointes, ce qui a généralement pour effet de contrarier la tendance syncrétique³⁴⁵ naturelle de l'élève et, comme le dit Etienne, d'« embrouiller ».³⁴⁶

5.3.4. La dimension historique : l'identification aux savants disparus

De nombreux élèves reviennent sur la dimension historique du *Dialogue*, dimension qui, selon eux, présente de nombreux avantages. Tout d'abord, l'engouement de certains élèves pour le texte semble lié à l'intérêt suscité par l'histoire en général, comme l'indique cet extrait d'entretien avec Charles (binôme 2) :

- Prof : Pouvez-vous dire si vous avez apprécié ce texte, et pourquoi ?
- Charles : C'est bien, ça change, et ça ressemble à l'histoire.
- Prof : Et c'est bien que ça ressemble à l'histoire ?
- Charles : Ben oui.

Camille (binôme 1) exprime une opinion très proche de celle de Charles :

- Prof : Est-ce que ce texte vous a plu ? Est-ce que vous pouvez essayer de dire pourquoi ?
- Camille : En fait, c'est bien parce que c'est comme l'histoire. **C'est intéressant de faire de l'histoire en sciences.**
- Prof : Pourquoi ?
- Camille : Parce que **ça permet de voir comment on pensait avant.**

³⁴⁵ Selon une approche psychologique, le terme « syncrétisme » désigne une tendance à combiner de façon peu cohérente différents systèmes, à appréhender de manière globale et indifférenciée des objets ou des domaines distincts les uns des autres. D'après la définition proposée par *Le Robert*, édition 2004.

³⁴⁶ Ce qui pourrait apparaître comme une carence du système éducatif secondaire semble avoir été au cœur de la réflexion menée autour des Itinéraires de Découverte du collège.

Ensuite, (et c'est l'idée que l'on trouve exprimée dans la dernière remarque de Camille), l'histoire telle que nous l'avons mise en scène dans notre texte permet aux élèves d'avoir accès à la pensée des anciens, ce que la plupart paraît apprécier, comme Julie (binôme 5) : « C'est intéressant de parler des gens, avant, de ce qu'ils ont fait / ce qu'ils pensaient » ou Kevin : « Ce qui est marrant, c'est qu'on disait la même chose qu'eux ». L'intérêt pour la pensée du savant disparu est également souligné par Océane (binôme 3) :

Moi j'ai bien aimé. C'est de l'histoire des sciences et c'est bien parce que ça sert à savoir ce que les autres pensaient avant. En plus, **moi ce que j'ai dit tout à l'heure** [l'œil envoie une vision], **c'était comme le début du texte alors ça me rassure de voir qu'il y en a qui ont pensé pareil.**

Et par Annabelle (binôme 1) :

On a reconnu nos idées, mais elles étaient fausses. Ça veut dire qu'on s'est trompé, comme eux. Mais eux c'est comme des savants et pas nous // donc là, **quand on se trompe, c'est moins grave.**

L'argument développé par Annabelle et par Océane montre que l'opportunité qui est offerte aux élèves de pouvoir s'identifier aux personnages du texte a quelques effets positifs. D'une part, le fait qu'ils puissent rapprocher leurs idées de celles des anciens semble leur permettre de dédramatiser la portée de leur erreur, ou, sur un registre identique, de valoriser leurs réponses lorsque celles-ci sont correctes. C'est en tout cas l'opinion d'Etienne (binôme 5) :

Moi je savais que les théories du début étaient fausses et **c'est gratifiant de contredire un savant** et d'avoir raison.

Par le jeu de l'identification au savant disparu, l'histoire des sciences devient par conséquent un outil de valorisation performant, mais également un outil d'apprentissage identifié comme tel par Morgane (binôme 2) :

En fait, comparer par rapport à avant comment on a compris, **ça peut aider après si on a les mêmes problèmes qu'eux.**

Parce qu'elle est témoin du cheminement ayant conduit à l'élaboration d'une explication optique de la vision, la perspective historique constitue donc pour certains élèves une aide à l'apprentissage, un moyen de comprendre comment les connaissances se sont construites.

Il ne fait guère de doute que les élèves interrogés apprécient la spécificité historique de notre *Dialogue*. Outre les motivations liées à l'histoire en elle-même, les raisons invoquées font majoritairement état d'une possible identification de leurs idées à celles développées par les personnages du texte. Or, ce qui nous paraît fondamental, c'est que ceux-ci soient reconnus comme les tenants de théories ayant existé. Autrement dit, le *Dialogue* ne semble pas perçu

comme un inventaire d'idées fictives sans attache historique, mais bien comme la mise en scène crédible d'une polémique qui aurait réellement pu se tenir dans le passé. Le fait que les noms de certains savants soient cités contribue sans doute à faire de ce texte un support historique identifié comme tel par les élèves. D'ailleurs, on aura pu remarquer, à la lecture des extraits d'entretiens sur lesquels nous avons fondé notre analyse, que certains élèves évoquent le nom d'Aristote. De même, la part prise par Alhazen dans l'histoire de l'optique est-elle soulignée par Océane, et ce, d'une façon tout à fait inattendue :

Le texte est intéressant parce qu'il **valorise la découverte d'un arabe**, comment il s'appelle déjà ? // Attendez, c'est là, dans le texte / Voilà, Alhazen ! Et ça, **c'est bien contre le racisme**.

Ce dernier avantage lié à l'utilisation de l'histoire des sciences et mis en avant par Océane n'est sans doute pas à négliger.

6. Résultats

Les entretiens tels que nous les avons réalisés nous ont permis de suivre pas à pas le cheminement des élèves tout au long de la séance d'apprentissage, et ce en respectant la trame du scénario que nous avons initialement prévu. La plupart des hypothèses que nous avons formulées se sont vues confirmées par les réactions des élèves à chacune des étapes des entretiens. De plus, le fait que nous ayons procédé à des interviews avec des binômes (et non de façon individuelle) a favorisé l'émergence de débats contradictoires dans lesquels les élèves ont parfois dû faire preuve d'une force argumentative suffisamment convaincante pour imposer leurs opinions. Mais cela a permis également à certains de profiter des explications proposées par leur camarade pour progresser dans leur cheminement intellectuel.

L'attention portée aux idées des élèves à propos de la vision (voir première partie) nous a permis d'anticiper les explications qu'ils étaient susceptibles de proposer. Grâce à cela, nous avons élaboré un texte dans lequel ils ont pu projeter, dès le début de l'entretien, leurs propres représentations de la vision. Par ce procédé, nous avons favorisé l'identification des élèves aux personnages du *Dialogue*, ce qui a eu pour effet de valoriser chacune de leurs réponses (qu'elle fut correcte ou non), et de les mettre en confiance (nous avons, parmi les élèves interrogés, des élèves de niveau plutôt faible). Les élèves ont alors pu adhérer au parcours cognitif mis en scène par le texte.

Dans notre partie historique (voir deuxième partie), nous avons mis en évidence les différentes idées qui peuvent être considérées comme les étapes clés de l'évolution rationnelle des théories de la vision : il s'agit tout d'abord de considérer les cinq sens selon une modalité de fonctionnement commune fondée sur la passion, d'accepter que la lumière a un effet sur l'œil, et de rompre, par une expérience de pensée, le lien qui unit la sensation d'éblouissement à l'entrée de la lumière dans l'œil afin d'en créer un autre qui associe la vue à l'entrée de la lumière dans l'œil. Cette dernière étape est conditionnée par un traitement quantitatif de la « bonne » lumière, et peut être aidée par une analogie entre le mécanisme de la vision et celui de l'ouïe. Ces idées ont constitué l'ossature de notre texte et les paliers sur lesquels nous avons bâti le scénario de nos entretiens. Suite à l'analyse de ces entretiens, nous avons constaté que ces mêmes idées permettaient aux élèves de remettre en cause leurs représentations initiales et de leur substituer progressivement une explication satisfaisante du mécanisme de la vision. Dans le domaine restreint du mécanisme optique de la vision, il apparaît par conséquent envisageable de transposer un cheminement historique à un processus individuel d'acquisition des connaissances.

Bien entendu, tous les élèves n'ont pas suivi un parcours cognitif identique. Etienne, avait une idée très précise du mécanisme de la vision. Notre situation d'apprentissage n'a fait que le conforter dans son opinion, ce qui n'a pas été sans lui déplaire puisqu'il a pu « contredire » (selon ses propres termes) d'autres savants. Contrairement à tous les autres élèves, Camille est restée insensible à l'argument selon lequel tous les sens fonctionnent sur le mode de la passion. Elle a maintenu son interprétation de la vision (dans un sens œil → objet), et n'a changé d'avis qu'au moment de l'évocation de la situation d'éblouissement. Quant à Morgane, elle n'a pas accepté le raisonnement par analogie qui consistait à comparer les effets du son sur l'oreille à ceux de la lumière sur l'œil. En outre, certains élèves ont spontanément fondé leurs raisonnements sur des considérations concernant les modifications morphologiques de la pupille alors que le texte n'y fait aucune allusion. Et ce qui nous semble remarquable, c'est que des considérations identiques ont contribué à l'émergence des théories rationnelles de la vision dans l'histoire³⁴⁷. Enfin, certains élèves ont spontanément admis que la lumière pouvait être une « chose » invisible. Même si ce résultat n'était pas un objectif

³⁴⁷ Voir deuxième partie.

explicite de notre séquence, ce dernier point nous montre que notre *Dialogue* mériterait d'être suivi par l'exploitation d'une situation expérimentale dans laquelle les élèves pourraient constater que la lumière d'un faisceau ne se voit pas « de profil ».

Malgré ces différences de réaction, tous les élèves ont fini par admettre que pour voir un objet, il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil de l'observateur. Ils ont compris que cela implique que les objets renvoient la lumière qu'ils reçoivent à partir du moment où ils sont éclairés, et que ce renvoi n'est pas conditionné par la gêne provoquée par l'entrée de la lumière dans l'œil qui demeure empiriquement indétectable. Globalement donc, tous les élèves sont parvenus à :

- Etendre le lien causal qui unit l'entrée de lumière dans l'œil et la sensation d'éblouissement, à la vision,
- Réaliser le saut conceptuel nécessaire à la formulation d'une nouvelle explication de la vision,
- Utiliser un raisonnement en « quantité de lumière » (ce raisonnement s'est d'ailleurs révélé opérationnel dans des situations différentes de celles de la vision humaine).

Autre point important, notre séance a globalement reçu l'assentiment des élèves interrogés. Et nous avons retrouvé dans leurs commentaires des opinions assez proches de celles qu'avaient exprimées les élèves de troisième à propos du *Dialogue* de Galilée (voir annexe). Ceux-ci apprécient le texte non seulement pour la spécificité du procédé littéraire utilisé (la forme dialoguée), mais également pour la démarche cognitive qu'il met en scène. Celle-ci permet aux élèves d'exploiter un procédé d'apprentissage fondé sur un principe d'identification, de profiter d'un espace et d'un support d'enseignement transdisciplinaire. En outre, cette démarche semble favoriser chez l'élève une certaine prise de conscience de son propre cheminement cognitif, puisque certains sont capables d'analyser avec lucidité les éléments qui leur ont permis de modifier leur représentations initiales ou d'accéder à un nouveau savoir.

Pour conclure, notre analyse nous autorise à penser que l'utilisation d'une controverse historique présentée sous la forme d'un dialogue, et intégré dans un scénario didactique particulier (que nous avons largement détaillé) constitue, non seulement un outil d'accompagnement intellectuel opérationnel, mais également un support de motivation efficace. Bien entendu, l'apprentissage ne peut en aucun cas procéder d'une modalité unique

d'accompagnement. Le texte s'invite en complément des dispositifs expérimentaux, des modèles que l'enseignant a coutume d'utiliser (expérience des faisceaux, des écrans diffusants, maquette de l'œil notamment). Il n'existe pas de voie unique pour apprendre. En multipliant les supports cognitifs, l'enseignant diversifie les voies d'accès au savoir.

CONCLUSION

A l'heure actuelle, les enseignants de sciences sont incités à intégrer à leurs cours un certain nombre d'éléments d'histoire des sciences. Dans les faits, ils disposent, aujourd'hui encore, de peu de supports pédagogiques leur permettant de mettre en œuvre de façon opérationnelle un enseignement qui s'y réfère. En réalité, si ces supports existent, ils sont souvent limités (c'est le cas par exemple dans les manuels scolaires) à la biographie des savants les plus renommés, à une revue chronologique de faits déterminants ayant conduit à une découverte particulière, ou encore à quelques extraits de textes anciens dans lesquels sont décrites les expériences et les idées les plus marquantes de l'histoire. Ces supports se posent, pour la plupart d'entre eux, comme des compléments documentaires à l'enseignement scientifique.

Nous avons entrepris notre recherche dans l'objectif de proposer un enseignement d'optique assisté par l'histoire des sciences. Nous avons pour préoccupation essentielle de construire un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision où l'histoire de ce mécanisme s'exprimerait de façon à accompagner le cheminement cognitif des élèves. Le savoir auquel nous avons choisi de nous intéresser –« pour voir un objet il est nécessaire que de la lumière provenant de cet objet pénètre dans l'œil de l'observateur »- constitue l'un des objectifs du programme de sciences du cycle III de l'école élémentaire et du cycle central du collège. Il nécessite de la part de l'élève un effort d'abstraction considérable qui mérite d'être soigneusement guidé. L'expérience, la schématisation, le discours explicatif constituent les moyens pédagogiques généralement utilisés par l'enseignant au cours de ses séances d'optique. Dans le cas particulier du mécanisme optique de la vision, ceux-ci doivent permettre à l'élève de surmonter les difficultés sous-jacentes à l'acquisition de cette nouvelle explication, et d'accepter l'idée que lorsque l'on regarde un objet, de la lumière provenant de cet objet entre dans l'œil alors qu'aucune manifestation sensible évidente de ce phénomène n'est perçue.

Nous avons fait l'hypothèse que l'histoire des sciences pouvait également constituer l'un de ces moyens pédagogiques, à condition toutefois qu'elle puisse s'exprimer sous une forme qui favorise l'apprentissage et suscite l'intérêt des élèves. Cet aspect a conditionné l'ensemble de notre travail. Il s'agissait de construire un support d'enseignement fondé sur l'histoire des

sciences, et d'en évaluer l'impact cognitif sur des élèves. Nous pensons que notre recherche apporte un certain nombre d'éléments susceptibles d'enrichir une réflexion centrée d'une part sur l'élaboration et l'évaluation d'outils d'apprentissage à composante historique, et d'autre part sur les interactions entre didactique et histoire des sciences.

Dans une approche constructiviste, l'élaboration d'un outil d'enseignement nécessite que l'on s'intéresse à l'état conceptuel initial des élèves, en particulier, à leurs connaissances préalables. Il était par conséquent nécessaire que nous consacrons une partie de notre recherche à la définition de cet état, c'est-à-dire à la caractérisation des idées des élèves à propos de la vision avant enseignement. Les résultats que nous avons obtenus viennent certes confirmer ceux des recherches antérieures, mais à ceux-ci s'ajoute l'analyse de notre investigation centrée sur de très jeunes enfants dont les idées à propos de la vision n'avaient, semble-t-il, pas encore été présentées dans la littérature didactique de manière aussi détaillée.

Cette investigation (réalisée sous la forme d'entretiens individuels) associée à l'analyse de raisonnements d'élèves de quatrième (avant l'enseignement de l'optique) sur le même sujet nous permet de constater que les conceptions des élèves à propos de la vision et du rôle de la lumière dans la vision évoluent peu entre 5 et 13 ans. Nous retiendrons en particulier que lorsque les élèves, quel que soit leur âge, représentent le mécanisme de la vision d'un objet en utilisant des flèches dirigées vers l'œil (à partir de l'objet), ou vers l'objet (à partir de l'œil), celles-ci ne désignent que rarement la lumière. Par conséquent, il semble que certains auteurs aient proposé une interprétation quelque peu abusive en identifiant la flèche qui sort de l'œil à la lumière.

En réalité, nous constatons que cette flèche désigne parfois une entité quasi-matérielle. Certains enfants parlent de « quelque chose » qui, sortant de l'œil, touche l'objet et en prend la forme ou la couleur. L'identification de ce « quelque chose » à une « main » est même, dans quelques cas, tout à fait explicite. Il semble que nous puissions rapprocher cette idée de celle exprimée par d'autres élèves qui affirment, à juste titre d'ailleurs, que l'on peut « voir » un objet dans l'obscurité en « le touchant », étant entendu que le verbe « voir » est ici pris dans le sens du verbe « identifier ». Pour ces élèves le toucher peut prendre le relais de la vision dans des situations où cette dernière est impossible (comme cela peut être le cas dans l'obscurité totale).

En outre, que la vision soit expliquée dans un sens œil→objet ou dans un sens objet→œil, il est intéressant de retenir que l'objet constitue dans quelques cas une zone de discontinuité du raisonnement, c'est-à-dire une limite entre un raisonnement fondé sur la lumière (entre la source lumineuse et l'objet) et un raisonnement fondé sur une entité différente de celle-ci (entre l'objet et l'observateur). Dans le cas où les élèves expliquent la vision dans un sens objet→œil, l'entité qui, partant des objets, pénètre l'œil peut être « des petites particules », « une image », une copie de l'objet, etc. Dans le cas inverse (sens œil→objet), les élèves parlent essentiellement de « vision » ou de « regard ». De ce point de vue, la dimension physio-psychologique de l'explication du mécanisme de la vision prend le pas sur la dimension physique. Or, cet aspect physio-psychologique demeure essentiel, et il n'est donc pas question de rejeter ce type de raisonnement, mais peut-être de faire en sorte que celui-ci soit complété, dans l'enseignement, par une explication fondée sur la *lumière* et sur le phénomène de la diffusion.

L'analyse de notre séquence d'enseignement montre d'ailleurs qu'une partie des élèves ayant participé à notre recherche refuse de remplacer une explication fondée sur « le regard » par une autre fondée sur la *lumière*, et préfère que celles-ci cohabitent. Ce compromis se justifie, selon nous, à deux niveaux distincts : au niveau scientifique, il permet de réunir deux dimensions essentielles à la compréhension de la vision en associant le rôle de la personne qui regarde à l'action de la *lumière* ; au niveau pédagogique, il permet de conserver une tendance majoritaire du raisonnement qui gagnera à être enrichie par un raisonnement davantage physique (tourné vers la lumière) et biologique (axé sur une description plus anatomique de l'œil).

Ces résultats viennent s'ajouter à ceux des recherches précédentes, mais surtout, ils nous ont permis de caractériser un état de connaissance en optique à partir duquel nous avons pu orienter l'élaboration de notre outil d'enseignement. Nous nous sommes notamment appuyée sur l'existence, parmi les élèves, d'une controverse autour du « sens » de la vue, et sur le fait qu'ils ne considèrent que rarement la lumière comme un *stimulus* de l'œil, puisque dans leurs explications, le terme « lumière » renvoie (et cela semble tout à fait légitime avant tout enseignement d'optique) aux significations du langage courant.

L'histoire du mécanisme de la vision est le théâtre d'une controverse analogue. Dès l'Antiquité, et pendant plus de quinze siècles, les savants s'opposent sur le « sens » de la vue.

L'explication du mécanisme optique de la vision proposée au 11^e siècle par Alhazen ouvre la voie à un consensus qui ne se manifeste réellement dans la société savante occidentale qu'au 17^e siècle lorsque Kepler rédige les *Paralipomènes*. Il a fallu un temps considérable et un grand nombre de querelles intellectuelles pour que la communauté scientifique accepte l'idée que la vision nécessite l'action d'une entité invisible sur l'œil. Ces données historiques sont autant de signes qui témoignent de l'ampleur de la difficulté du savoir auquel nous avons choisi de nous intéresser. Anticiper les éléments qui risquent de faire obstacle à l'enseignement n'est pas l'unique potentialité cognitive de l'histoire des sciences. Celle-ci permet également d'orienter certaines stratégies pédagogiques. A ce propos, la reconstruction historique que nous avons présentée en deuxième partie de cette recherche fournit un cheminement rationnel qui, de la controverse autour du « sens » de la vue, aboutit à une explication consensuelle du mécanisme optique de la vision. Ce cheminement se fonde sur les idées qui, de notre point de vue, semblaient constituer des avancées décisives. Nous avons donc choisi de les intégrer à notre outil d'enseignement. Pour des raisons essentiellement liées à la portée pédagogique supposée d'une possible identification des élèves aux Anciens, il nous paraissait également important que ces idées soient représentées par leurs auteurs.

Fallait-il pour autant construire un support d'enseignement qui intègre des extraits de textes anciens ? Cette question est longtemps restée sans réponse. Certaines situations d'apprentissage revendiquant une approche historique sont élaborées sur la base d'extraits de textes scientifiques anciens présentés aux élèves. Ces textes sont le plus souvent narratifs ; les auteurs y décrivent une expérience ou une découverte. En général, ils sont accompagnés de questions de compréhension. A titre d'exemple, il peut être demandé à l'élève d'expliciter les propos de l'auteur, de réaliser l'expérience relatée ou, lorsque l'expérience n'est pas reproductible en classe, d'en expliquer les fondements. Dans les faits, l'impact cognitif de ces séquences n'a que très peu été étudié. L'exploitation de courts extraits telle qu'elle apparaît dans certaines propositions pédagogiques nous semblait insuffisante. Il s'agissait, par conséquent, de faire en sorte que l'élève dispose d'un ensemble d'éléments qui rende compte de la cohérence du cheminement historique, en particulier du problème initial, des hypothèses, des débats et des propositions expérimentales et/ou rationnelles. Notre souci était que les élèves puissent également identifier leurs propres idées à certaines idées du passé.

Ceci nous a conduit à nous interroger sur la possibilité d'un rapprochement entre les idées des Anciens à propos de la vision et celles des élèves d'aujourd'hui. Nous avons constaté

qu'il existait de part et d'autre une controverse à propos du « sens » de la vue d'où la lumière était pratiquement absente. Nous avons donc construit notre support en référence à cette controverse, de façon à ce que les élèves aient la possibilité de se positionner par rapport aux idées antérieures, et surtout de s'y reconnaître. Ce travail sur le rapprochement historico-psychogénétique nous a également permis d'envisager une lecture novatrice de l'histoire des théories antiques de la vision en prêtant une attention particulière à l'utilisation du mot « lumière » dans les écrits des philosophes hellènes. Inspirée par les difficultés des élèves liées à la polysémie de ce terme, nous avons insisté sur le fait qu'il paraît difficile d'interpréter le *phaos* grec comme une entité lumineuse. Pas plus que les enfants ou les élèves, les savants de l'Antiquité ne considèrent leurs yeux comme susceptibles d'envoyer de la lumière (au sens de ce qui est émis par une source lumineuse). L'analyse didactique des raisonnements des élèves offre la possibilité d'une investigation complémentaire de l'histoire des sciences. En particulier l'analyse des difficultés des élèves permet de mesurer l'ampleur de l'obstacle que l'histoire est parvenue à surmonter. De plus, la façon dont nous entendons utiliser l'histoire des théories de la vision a conditionné une approche particulière pour le travail de reconstruction que nous avons réalisé. Nous avons adopté une position proche de l'internalisme. Nous avons ainsi pu mettre en évidence un itinéraire rationnel ayant conduit à l'élaboration d'un modèle optique de la vision qui intègre un ensemble cohérent d'éléments permettant la compréhension de ce modèle.

En outre, il paraissait souhaitable que la forme utilisée soit à la fois attractive et accessible. Inspirée par une séquence de mécanique réalisée en classe de troisième à partir du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée, et convaincue de l'efficacité pédagogique de l'expression dialoguée, nous avons décidé de construire un scénario didactique autour d'un dialogue que nous avons nous-même créé : le *Dialogue sur les manières dont se fait la vision*. Ce dialogue met en scène la controverse autour du « sens » de la vue ainsi que son règlement. Il intègre les idées clés de l'histoire des théories de la vision qui sont explicitement représentées par leurs auteurs. En particulier, notre dialogue s'achève sur une idée qui constitue, selon nous, l'une des avancées les plus marquantes de l'histoire des théories de la vision. Celle-ci revient à traiter la lumière de façon quantitative, c'est-à-dire à faire de la lumière une entité dont il devient possible d'interpréter les différents effets sur l'œil en utilisant des expressions telles que « trop de lumière » pour justifier l'éblouissement ou « suffisamment de lumière » pour expliquer en partie le mécanisme optique de la vision

(l'expression « trop peu de lumière » s'applique alors à des situations où la vision est difficile).

Notre support d'enseignement consiste en un dialogue structuré autour d'un certain nombre d'avancées conceptuelles indissociable d'un scénario qui en commande les règles d'utilisation. Il n'a pas vocation à conclure un chapitre d'optique, pas plus qu'il ne constitue un supplément documentaire à l'enseignement. Il sert à guider l'élève dans son processus d'apprentissage, et pouvait donc être utilisé comme un outil introductif.

Nous avons mis ce support à l'épreuve d'une situation d'apprentissage dans des conditions particulières d'enseignement puisqu'ils s'agissait d'entretiens réalisés successivement avec six binômes d'élèves de quatrième avant tout enseignement d'optique. Cette modalité nous a permis de suivre l'itinéraire cognitif des élèves concernés et de dégager certains éléments grâce auxquels l'évaluation de notre support devenait possible.

Tout d'abord, nous n'avons pas constaté de réaction de rejet de la part des élèves. Ceux-ci se sont très rapidement approprié le texte que nous leur avons présenté en suivant avec intérêt le cheminement proposé. Du point de vue de l'acquisition des connaissances, ils ont su dépasser les difficultés associées au savoir qu'ils avaient à construire (celles liées notamment à la polysémie du mot « lumière » ainsi qu'à leurs propres conceptions du mécanisme de la vision). Ils ont réalisé d'importants progrès conceptuels en adoptant une nouvelle signification du terme *lumière*. Celle-ci les a conduit non seulement à modifier leurs représentations initiales en proposant une explication de la vision scientifiquement acceptable, mais également à transposer cette connaissance nouvellement acquise à d'autres situations optiques. A titre d'exemple, la plupart d'entre eux est parvenue à expliquer la vision des ombres en adoptant un raisonnement quantitatif. Ceci nous laisse entrevoir la possibilité d'aborder la notion d'*ombre* en y associant la vision et la lumière traitée de façon quantitative. De plus, il est remarquable de noter que certains élèves sont parvenus à affirmer que la *lumière* est invisible alors que cet aspect ne faisait pas explicitement partie de nos intentions didactiques initiales : parler de la *lumière* comme d'une « chose » invisible n'était pas un savoir que nous avions prévu de faire acquérir aux élèves, même s'il demeure implicitement présent dans l'explication du mécanisme optique de la vision telle nous l'envisagions. En outre, certains élèves ont étayé leur réflexion en recourant spontanément à l'exemple de la modification de l'ouverture de la pupille de l'œil, sans que cela leur soit suggéré, ni par le

texte, ni par nous-même. Nous avons en effet décidé d'en faire un outil d'évaluation et non pas une aide à l'apprentissage. Rappelons à ce sujet que les considérations historiques autour du fonctionnement de la pupille paraissent avoir contribué à l'élaboration d'un modèle optique de la vision scientifiquement acceptable. L'étude de la pupille de l'œil serait donc un élément incontournable de la compréhension du mécanisme optique de la vision ? Quoiqu'il en soit, nous constatons que notre support a favorisé l'acquisition de connaissances, et ce, bien au-delà de nos attentes.

Outre cet aspect essentiellement cognitif, nous retenons que le texte et le scénario qui l'accompagne constituent un facteur de motivation indéniable. Les élèves apprécient le procédé littéraire utilisé et semblent particulièrement sensibles au fait que notre support d'enseignement facilite l'apprentissage par une approche pédagogique transdisciplinaire. L'association soulignée par eux-mêmes entre littérature, histoire et sciences leur paraît efficace et souhaitable car elle empêche, selon eux, une dispersion souvent à la source de trop nombreuses confusions. Mais l'aspect le plus motivant demeure sans aucun doute la possibilité qui leur est offerte de s'identifier aux savants disparus. Elle permet aux élèves de dédramatiser la portée de leurs erreurs, ou de valoriser certains de leurs raisonnements lorsque ceux-ci s'avèrent exacts. En outre, certains élèves remarquent que la voie par laquelle un problème est résolu dans l'histoire peut constituer une piste pour la résolution d'un problème similaire dans l'enseignement. Enfin, rappelons que l'une des élèves ayant participé à notre recherche voit, dans notre dialogue, un moyen de valoriser les découvertes issues de peuples différents. Dans un contexte scolaire multiculturel, notre dialogue aurait donc une valeur citoyenne.

Un dernier élément d'évaluation mérite d'être souligné. Les élèves semblent majoritairement conscients du cheminement intellectuel qui les conduit à formuler une nouvelle explication du mécanisme optique de la vision. La plupart d'entre eux réalise que leurs idées évoluent au cours de l'entretien, certains sont capables de dire spontanément, et de façon assez précise, à quel moment et pour quelles raisons ils modifient leurs conceptions initiales. Cet aspect métacognitif prend une part sans doute plus importante que celle que nous avons anticipée. Or, si l'efficacité d'un enseignement dépend en partie de la capacité de l'élève à analyser l'impact de ses procédures d'apprentissage, force est de constater que notre support se révèle, de ce point de vue, plutôt performant. Ajoutons pour finir, que ces conclusions prometteuses

concernent tous les élèves ayant participé à nos entretiens, alors que ceux-ci étaient de niveaux scolaires très hétérogènes.

Ces différents résultats nous encouragent à mettre notre outil d'enseignement à l'épreuve d'une situation de classe, c'est-à-dire dans des conditions habituelles d'enseignement des sciences physiques. Dans une perspective à court terme, nous entendons réaliser une séance d'apprentissage en quatrième mais également en CM2 (dernière année du cycle III de l'école élémentaire) puisque les objectifs d'enseignement concernant la vision sont proches. La séance sera construite à partir de notre dialogue et respectera la trame du scénario didactique dans lequel il s'inscrit. En outre, nous ferons en sorte que les élèves puissent travailler par binômes. Cette modalité pourra favoriser les interactions entre élèves dont nous avons pu examiner les effets bénéfiques au cours de nos entretiens. En particulier, dans le cas où leurs opinions divergeraient, ils pourraient s'approprier plus facilement la controverse du dialogue par le jeu d'une identification aux protagonistes mis en scène. Nous placerons nos interventions au début de l'enseignement du programme d'optique des deux niveaux concernés. Dans le cas du primaire, notre séance pourra constituer l'amorce d'un enseignement centré sur le thème « Lumière et Ombres », mais sa réalisation nécessitera sans doute l'adaptation de notre texte aux capacités de compréhension des élèves ; ce travail pourra se faire en concertation avec les enseignants du primaire.

Là encore, nous chercherons à mettre à l'épreuve plusieurs hypothèses portant essentiellement sur l'attitude cognitive des élèves en réaction à une stratégie didactique particulière élaborée à partir d'une succession de situations de réflexion. Il s'agira de mesurer les effets induits par certaines mises en situations, par certaines propositions de raisonnement ou d'expériences de pensée. En particulier, nous regarderons la façon dont les élèves réagissent au problème de l'unité de fonctionnement des cinq sens, à l'évocation du phénomène d'éblouissement, au raisonnement par analogie fondé sur un rapprochement entre la vue et l'ouïe, et à l'idée que la lumière peut être traitée de façon quantitative.

Nous souhaiterons également mesurer l'impact de notre séance sur la motivation des élèves et sur l'aspect métacognitif que nous évoquions précédemment. Les critères dégagés par l'analyse des entretiens (identification aux savants disparus, attrait du procédé littéraire utilisé, sensibilité à l'aspect transdisciplinaire, perception des progrès réalisés) serviront de grille de lecture initiale pour l'évaluation de notre séance d'enseignement.

A moyen terme, nous entendons que notre outil d'apprentissage profite aux enseignants du collège et de l'école primaire. Une telle perspective nous amènera à nous intéresser aux représentations des enseignants à propos du mécanisme de la vision. L'enquête (certes modeste) que nous avons réalisée avec quelques professeurs des écoles stagiaires nous laisse penser que le sujet demeure difficile puisque l'on retrouve, chez ces adultes, des idées proches de celles des enfants et des adolescents dans lesquelles la dimension physio-psychologique de la vision l'emporte sur l'explication physique. Afin d'avoir une idée plus précise de ces difficultés, il conviendra d'interroger un échantillon d'enseignants du primaire plus important et d'y adjoindre une étude portant sur les représentations des enseignants de sciences physiques du collège. Nous procéderons également à l'analyse des idées que les enseignants des deux niveaux se font des difficultés des élèves sur ce sujet. En particulier, nous regarderons s'ils ont conscience de l'obstacle que constitue le caractère polysémique du mot « lumière ».

Nous souhaiterions à plus long terme que notre outil d'apprentissage soit utilisé en classe par les enseignants du primaire et du collège. Pour cela, une formation des enseignants s'avérera sans doute nécessaire. Celle-ci aura pour objectif, non seulement de les sensibiliser aux difficultés évoquées précédemment (celles des élèves, celles intrinsèques au savoir à enseigner, celles liées éventuellement à leurs propres conceptions), mais également d'explicitier le *modus operandi* de notre dialogue qui nécessite la mise en place d'un scénario didactique particulier. Une telle formation nous permettra d'accéder aux raisons qui motiveront le rejet ou l'adhésion des enseignants formés à l'outil qui leur sera présenté. Si par la suite, une utilisation en classe par ces enseignants formés s'avérait effective, nous disposerions alors des éléments nécessaires à l'évaluation de l'efficacité de notre outil, sans que nous ayons nous-même à intervenir directement auprès des élèves.

Enfin, nous envisageons d'appliquer notre méthode d'utilisation de l'histoire des sciences (mise en scène d'une controverse scientifique et de son règlement sous la forme d'un dialogue) à d'autres domaines de l'enseignement des sciences. La controverse à propos de l'existence du vide sera sans aucun doute le sujet auquel nous nous intéresserons prochainement. Les difficultés liées au concept de *vide* présentent selon nous, certaines similitudes avec celles liées au concept de *lumière* tel qu'il est défini dans les théories de la vision. Comme la lumière, le vide est un objet invisible ; il n'est concevable que par une

expérience de pensée. En outre, les manifestations sensibles de sa présence peuvent faire l'objet d'interprétations diverses comme en témoignent les débats suscités au milieu du 17^e siècle par l'expérience de Toricelli. Comme pour la controverse à propos de la vision, notre outil d'apprentissage sera construit à partir d'un dialogue témoin du cheminement rationnel ayant conduit la communauté savante à accepter l'existence du vide.

Un enseignement assisté par l'histoire des sciences peut faciliter l'apprentissage à condition toutefois d'examiner un certain nombre de questions portant notamment sur le rôle effectif de l'histoire. Quelle que soit la façon dont l'histoire des sciences sera abordée, il semble qu'il sera toujours nécessaire de revenir aux textes anciens. L'analyse didactique portant à la fois sur le savoir à enseigner et sur les raisonnements de sens commun offre une grille de lecture particulière de ces textes. Il semble donc qu'une réciprocité des apports entre histoire des sciences et didactique soit envisageable. Cette dimension ouvre de nouvelles pistes de réflexion qui méritent selon nous d'être explorées à la fois par les didacticiens et les historiens des sciences au sein d'une collaboration qui devrait s'avérer particulièrement productive.

BIBLIOGRAPHIE

1. ALBERTI L.B. *De la peinture* (1435), trad. J.L. Shefer, Macula-Dédale, 1992.
2. ALHAZEN, Le discours de la lumière, trad. R. Rashed in *Revue d'Histoire des Sciences et de leurs Applications*, n°21, 1968, 197-224.
3. ALHAZEN, *Kitab al-manazir (The optics of Ibn al Haytham)*, trad. A.I. Sabra, Livres I-III, University of London, London, 1989.
4. ANDERSON B. et KARRQVIST C. How Swedish pupils aged 12-15 years understand lights and its properties, in *European Journal of Science Education*, n°5, 1983, 387-402.
5. ARISTOTE, *De l'âme*, trad. E. Barbotin, Les Belles Lettres, 1989.
6. ARISTOTE, *De la sensation et des sensibles*, trad. P.M. Morel, Flammarion, 2000.
7. ARISTOTE, *Leçons de physique*, trad. J. Barthélémy Saint Hilaire, Presses Pocket, 1990.
8. ARTIGUES M. Ingénierie didactique in *Actes de la 5^e Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques*, Plestin les Grèves, août 1989.
9. ASTOLFI J.P. *Comment les enfants apprennent les sciences*, Retz, 1998.
10. ASTOLFI J.P. ET DEVELAY M. *La didactique des sciences*, PUF, 1989.
11. AUDIGIER F. ET FILLON P. *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques. Une approche pluridisciplinaire*, INRP, 1991.
12. BACHELARD G. *La formation de l'esprit scientifique* (1938), Vrin, 1993.
13. BACHELARD G. *Le rationalisme appliqué* (1949), PUF, 1962
14. BACHELARD G. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, 1951.
15. BALIBAR F. *Galilée, Newton lus par Einstein : espace et relativité*, PUF, 1986.
16. BALIBAR F. L'histoire des sciences, pour une école de pensée critique, *La culture scientifique et technique pour les professeurs des écoles*, Hachette éducation, 1993, 37-42.

17. BARBEROUSSE A. KISTLER M. ET LUDWIG P. *La philosophie des sciences au 20^e siècle*, Flammarion, 2000.
18. BENEGHIR A., *Transition électrostatique/électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*, thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1989.
19. BENEGHIR A. ET CLOSSET J.L. Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique, in *Didaskalia*, n°2, 1993, 31-47.
20. BLAY M. Etudes sur l'optique newtonienne, postface de *Optique* (1787) de Newton, trad. J.P. Marat, Christian Bourgeois Editeur, 1989.
21. BLOOR D. *Sociologie de la logique ou les limites de l'épistémologie* (1976), trad. D. Ebnöther, Pandore, 1976.
22. BOLLACK J. *Empédocle fragments* (1969), tome 2, Gallimard, Paris, 1992.
23. BOUWENS R. Misconceptions among pupils regarding geometrical optics, *Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Novak eds, vol. 3, Cornell University, Ithaca, New York, 1987, 23-28.
24. BROGLIE L. (DE) *Matière et lumière*, Albin Michel, 1937.
25. BRUNSCHVIG L. *Expérience humaine et causalité physique*, PUF, 1949.
26. CANGUILHEM G. *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Vrin, 1968.
27. CANGUILHEM G. et al. *Du développement à l'évolution au 19^e siècle*, PUF, 1962.
28. CAREY S. *Conceptual change in childhood*, MIT Press, Cambridge, 1985.
29. CASATI R. *La découverte de l'ombre, de Platon à Galilée, l'histoire d'une énigme qui a fasciné les grands esprits de l'humanité*, trad. P.E. Dauzat, Albin Michel, 2002.
30. CHARLOT B. *Du rapport au savoir*, Anthropos, 1997.
31. CHAUVET F. *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*, Thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1994.
32. CHEVALLARD Y. *La transposition didactique* (1985), La Pensée Sauvage, 1992.

33. CLOSSET J.L. *Le raisonnement séquentiel en électricité*, thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1983.
34. COLIN P. *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement*, thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1999.
35. CONDORCET J. (DE) *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* (1793), Flammarion, Paris, 1988.
36. DELAYE V. *L'explication du mécanisme de la vision des objets en cycle III : comment faire lorsqu'il n'y a pas d'expérience pour montrer ?* Mémoire professionnel, IUFM d'Alsace, 2004.
37. DESCARTES R. *Dioptrique* (1638), Fayard, 1987.
38. DIELS H. *Doxographi graeci*, 4^e édition, de Gryter, Berlin 1976.
39. DJEBBAR A. *Une histoire des sciences arabes*, Seuil, Paris, 2001,
40. DOISE W. *Logique sociale dans le raisonnement*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1993.
41. DOISE W ET MUGNY G. *Le développement social de l'intelligence*, InterEditions, 1981.
42. DOISE W. ET MUGNY G. *Psychologie sociale et développement cognitif*, Colin, Paris, 1997.
43. DORIER J.L. *Recherches en histoire et en didactique des mathématiques sur l'algèbre linéaire. Perspective sur leurs interactions*, Habilitation à Diriger les Recherches, Université Grenoble 1-Joseph Fourier, 1991.
44. DUHEM P. *La théorie physique, son objet, sa structure* (1906), Vrin, 1989.
45. EINSTEIN A. ET INFELD L. *L'évolution des idées en physique* (1936), trad. M. Solovine, Flammarion, 1983.
46. EUCLIDE *L'optique et la catadioptrique*, trad. P. Ver Eecke, Blanchard, 1959.
47. FAWAZ A. *Etude exploratoire sur les difficultés des élèves de première au Liban*. Thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1985.
48. FAWAZ A. et VIENNOT L. Image optique et vision, in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°686, 1986, 1125-1146.
49. FEHER E. et RICE K. Pinholes and images : children's conception of light and vision, in *Science Education*, vol. 71, n°4, 1987, 629-640.

50. FEYERABEND P. *Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance* (1975), trad. B. Jurdant, Seuil, 1979.
51. FEYNMAN R. *Lumière et matière, une étrange histoire* (1985), trad. F. Balibar et A. Laverne, Point Science, 1987.
52. FONTENELLE B. (DE), *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686), Oxford University Press, 1955.
53. GALILEE, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), trad. R. Fréreau, Seuil, 1992.
54. GALILI I. Student's conceptual change in geometrical optics, in *International Journal of Science Education*, vol.18, n°7, 1996, 847-868.
55. GOLDBERG F. et McDERMOTT L. An investigation of student's understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror, in *American Journal of Physics*, n°55, 1987, 108-119.
56. GOLDBERG F. BENDALL S. et GALILI I. Lenses, pinholes, screens and eye, in *The Physics Teacher*, n°9, 1991, 221-224.
57. GOHAU G. Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences, in *ASTER*, n°5, 1987.
58. GUESNE E. Lumière et vision des objets, un exemple de représentations des phénomènes physiques pré-existants à l'enseignement, *GIREP*, G. Delacôte eds, Taylor and Francis, London, 1976.
59. GUESNE E. Les conceptions des enfants sur la lumière, *New trends in physics teaching*, vol.4, UNESCO, 1984.
60. GUIDONI P. On natural thinking, in *European journal of science education*, vol. 7, 2, 1985, 133-140.
61. HALBWACHS F. *La pensée physique chez l'enfant*, Delachaux et Niestlé, 1974.
62. HIRN C. Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique des classes de quatrième, in *Didaskalia*, n°6, 1995, 39-54.
63. HOSSON C. (DE) La controverse historique : un outil didactique, in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, Juillet-Août-Septembre 2004, 1057-1068.
64. HOSSON C. (DE) L'histoire des sciences, un outil pour l'enseignement, in *Bulletin de l'APISP*, février 2004.
65. HOSSON C (DE) ET KAMINSKI W. Les yeux des enfants sont-ils des porte-lumière ? in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol.96, Janvier 2002, 143-162.

66. HOSSON C. (DE) *La formation d'image par une lentille convergente dans les programmes de 1992 de collège : éléments d'un bilan concernant les raisonnements des élèves*, Mémoire de DEA, Université Paris 7-Denis Diderot, 1998.
67. JOSHUA S. ET DUPIN J.J. *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques* (1993), PUF, rééd. 2003.
68. JUNG W. Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties, *Workshop Research in Physics Learning : Theoretical Issues and Empirical studies*, Bremen, 1991.
69. JUNG W. Preparing students for change : the contribution of the history of physics to physics teaching, in *Science and Education*, Vol. 3 n° 14, avril 1994.
70. KAMINSKI W. Conceptions des élèves (et autres) sur la lumière, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°176, 1989, 973-996.
71. KAMINSKI W. *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisonnement et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*, thèse, Université Paris 7, 1991.
72. KAMINSKI W. ET MISTRIOTI G. Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°94, 2000, 757-784.
73. KAMINSKI W. ET ISAMBERT J. Miroir plan en première S : image inversée ou lumière réfléchi ? in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°866, juillet-août-septembre 2004, 1069-1080.
74. KEPLER J. *Paralipomènes à Vitellion* (1604), trad. C. Chevalley, Vrin, 1980.
75. KOYRE A. *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, PUF, 1966.
76. KOYRE A. *Etudes galiléennes*, Hermann, 1966.
77. KUHN T. *La structure des révolutions scientifiques* (1962), trad. L. Meyer, Flammarion, 1983.
78. KUHN T. *La tension essentielle* (1977), trad. P. Samuel, Gallimard, Paris 1990.
79. KUHN T. On learning physics, in *Science and Education*, Vol 9, n°1, janvier 2000.
80. LAKATOS I. *Histoire et méthodologie des sciences* (1978), PUF, Paris, 1994.
81. LANGEVIN P. *La pensée et l'action*, Editions Sociales, Paris, 1964.

82. LA ROSA C. ET AL. Commonsense knowledge in optics : preliminary results of an investigation on the properties of light in *European Journal of Science Education*, 1984, 387-397.
83. LAUGIER-RABATE S. *L'anthropologie logique de Quine. L'apprentissage de l'obvie*, Vrin, 1992.
84. LAUGIER A. ET DUMON A. Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde, in *Bulletin de l'union des physiciens*, n°826, juillet-aout-septembre 2000, 1261-1283
85. LECOURT D. L'enseignement de la philosophie des sciences, *Rapport au Ministre de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie*, 1999.
86. LEJEUNE A. *Euclide et Ptolémée, deux stades de l'optique géométrique grecque*, Publication de l'Université de Louvain, 1948.
87. LEMEIGNAN G. et WEIL-BARAIS A. *Construire des concepts en physique*, Hachette Education, 1993.
88. LENA P. et BLANCHARD A. *Lumières. Une introduction aux phénomènes optique*, InterEditions, 1990.
89. LEVI-STRAUSS C. *La pensée sauvage*, Plon, Paris, 1962.
90. LINDBERG D.C. *Theory of vision from al Kindi to Kepler*, the University of Chicago Press, Chicago-London, 1976.
91. LUCRECE, *De Rerum Natura*, trad. A. Ernout, Les Belles Lettres, Paris, 1985.
92. MACH E. *The principle of physical optics, an historical and philosophical treatment*, New York, 1953.
93. MACHEREY P. *Comte. La philosophie des sciences*, PUF, 1989.
94. MAITTE B. *La lumière*, Seuil, Paris, 1981.
95. MALEBRANCHE N. (DE), *Eclaircissements sur la vision (1712)*, in *Œuvres Complètes*, Vrin, Paris, 1984.
96. MARTINAND J.L. *Connaître et transformer la matière*, Peter Lang, Berne, 1986.
97. MAURINES L. et MAYRARGUES A. De la vitesse de la lumière, in *Textes et documents pour la classe*, Scérén, n°866, décembre 2003.
98. MÉHEUT M. et PSILLOS D. Teaching-learning sequences : aims and tools for science education research, in *International Journal of Science Education*, vol. 26, n°5, avril 2004, 515-535.

99. MEIRIEU P. *Apprendre... Oui mais comment ?* ESF, 1987.
100. MEIRIEU P. *La métacognition, une aide au travail des élèves*, ESF, 2001.
101. MERLE H. Histoire des sciences et sphéricité de la Terre, in *Didaskalia*, n°20, 2002, 113-132.
102. MERLEAU-PONTY M. *L'œil et l'esprit* (1935), Folio, rééd. 2004.
103. MISTRIOTI G. *Optique géométrique et interprétation de la vision par les étudiants universitaires : un modèle d'interprétation de la vision d'une image virtuelle*, Thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 2003.
104. NEWTON I. *Optique* (1787), trad. J.P. Marat, Christian Bourgeois, 1989.
105. MUGLER C. *Dictionnaire historique de la terminologie optique des grecs*, Klincksiek, Paris, 1964.
106. NOEL B. *La métacognition*, De Boeck, Paris-Bruxelles, 1994.
107. OSBORNE J.F. ET BLACK P. Young children's (7-11) ideas about light and their development, in *International Journal of Science Education*, vol. 15, n°1, 1993, 83-93.
108. PARK D. *The fire within the eye. A historical essay on the nature and meaning of light*, Princeton University Press, Princeton, 1997.
109. PERRET-CLERMONT A.N. *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale*, Peter Lang, Bern, 1979.
110. PESTRE D. Les sciences et l'histoire aujourd'hui, in *Le débat*, n°102, 1998, 53-68.
111. PIAGET J. Les trois systèmes de la pensée de l'enfant. Etude sur les rapports de la pensée rationnelle et de l'intelligence motrice (1928), in L. Maury, *Piaget et l'enfant*, PUF, 1997, 24-44.
112. PIAGET J. *L'épistémologie génétique*, PUF, 1970.
113. PIAGET J. *De la pédagogie*, Odile Jacob, 1998.
114. PIAGET J. ET INHELDER B. *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1962.
115. PIAGET J. ET GARCIA R. *Psychogenèse et histoire des sciences*, Flammarion, Paris, 1983.
116. PIAGET J. ET GARCIA R. *Les explications causales*, PUF, 1971.

117. PLATON, *Théétète*, trad. L. Robin, *Œuvres complètes*, tome 2, La Pléiade, 1950.
118. PLATON, *Timée*, trad. E. Chambry, Gallimard, 1969.
119. QUINE W.O. *Relativité de l'ontologie et autres essais*, trad. J. Largeault, Aubier, 1977.
120. RAICHVARG D. La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ? in *Aster*, n°5, 1987, 3-34
121. RASHED R. L'optique géométrique, *Histoire des sciences arabes*, Seuil, Paris, 1997, 293-354.
122. RAYNAUD D. *La sociologie des controverses scientifiques*, PUF, 2003.
123. RIVIERE A. *La psychologie de Vygotsky*, Pierre Mardaga éditeur, Liège, 1990.
124. ROBRIEUX J.J. *Eléments de rhétorique et d'argumentation*, Dunod, 1993.
125. RODIECK R.W. *La vision* (1998), trad. F. Koenig-Supiot et O. Thoumine, De Boeck, Bruxelles, 2003.
126. RONCHI V. *L'optique, science de la vision*, Masson, 1966.
127. RONCHI V. *Une histoire de la lumière*, trad. J. Taton, Colin, 1956.
128. ROSMORDUC J. *Histoire des sciences*, Hachette éducation, Paris 1996, 16-22.
129. ROSMORDUC J., L'idée d'une structure de la lumière dans l'histoire de la physique, in *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, CNRS, n°2, 1977.
130. ROSMORDUC J. Histoire et pédagogie de la mécanique, *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n°8, novembre 1978.
131. ROSS D. *Aristote* (1953), trad. J. Samuel, Archives Contemporaines, 2000.
132. ROUX J.J. Médiations entre pairs et co-élaboration de savoirs en milieu scolaire, in *Education*, n°9, 1996, 20-22.
133. ROZIER S. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*, thèse, Université Paris 7, 1988.
134. RUSSEL G. La naissance de l'optique physiologique, *Histoire des sciences arabes*, Tome 2, Seuil, Paris, 1997, 319-352.
135. SABRA A.I. Form in Ibn al Haytham theory of vision, *Optics, astronomy and logic, studies in Arabic science and philosophy*, 1984.

136. SAINT AUGUSTIN, *Confessions*, trad. A. d'Andilly, Folio Classique, 1993.
137. SALTIEL E. *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*, Thèse, Université Paris 7-Denis Diderot, 1978.
138. SALTIEL E. ET VIENNOT L. What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? GIREP, Utrecht, 1985.
139. SALTIEL E. ET KAMINSKI W. Un exemple d'évaluation des nouveaux programmes : problèmes liés à l'évaluation elle-même et à la formation des maîtres, in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°786, 1996, 1171-1187.
140. SALTIEL E. ET MALGRANGE J.L. Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire, in *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°616, 1979, 1325-1354.
141. SANMARTI N. IZQUIERDO M. et WATSON R., The substantialisation of properties in pupil's thinking and the history of science, in *Science and education*, n°4, 1995, 349-369.
142. SCHRÖDINGER E. *La nature et les Grecs* (1954), trad. M. Bitbol, Seuil, Paris, 1992.
143. SERIS J.P. *La technique*, PUF, Paris, 1994
144. SHAPIN S. History of science and its social reconstructions in *History of science*, n°20, 1982, 157-211.
145. SHAPIN S. *La révolution scientifique*, trad. C. Larssonneur, Flammarion, 1998.
146. SHAPIN S. ET SHAFFER D. *Léviathan et la pompe à air*, trad. T. Piélat, La Découverte, 1993.
147. SCHIELE B. Note pour une analyse de la notion de coupure épistémologique, *Communication-information, les représentations*, CIRADE, vol.6, Montréal, 1976, 43-98.
148. SIMON G. *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, Seuil, Paris 1988.
149. SIMON G. *Archéologie de la vision. L'optique, le corps et la peinture*, Seuil, 2003.
150. SPELKE E. Principle of object perception, in *Cognitive Science*, n°14, 26-56.
151. SOLBES J. ET TRAVERS M. Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de física y química : mejora la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas, in *Enseñanza de la ciencia*, vol.19, n°1, 2001, 151-162.

152. TIBERGHIE A. Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière chez les enfants de 10 à 16 ans, in *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international d'été*, La Londe les Maures, CNRS, 1983, 125-136.
153. VALERY P. *Regard sur le monde actuel*, Gallimard, Paris, 1945.
154. VIARD J. Peut-on ignorer la cause du rebond ? Une question historique toujours d'actualité, *Enquête sur le concept de causalité*, sous la direction de L. Viennot et C. Debru, PUF, 2003, 31-55.
155. VIENNOT L. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Hermann, Paris, 1979.
156. VIENNOT L. *Raisonner en physique, la part du sens commun*, De Boeck Université, Paris-Bruxelles, 1996.
157. VIENNOT L. Recherche en didactique et nouveaux programmes : convergences, in *Didaskalia*, n°3, 1994, 125-136.
158. VIENNOT L. *Enseigner la physique, la part du sens commun*, De Boeck, Paris-Bruxelles, 2002.
159. VIENNOT L. ET DEBRU C. *Enquête sur le concept de causalité*, PUF, 2003.
160. VOILQUIN J. *Les penseurs grecs avant Socrate*, Flammarion, Paris, 1964.
161. VYGOTSKY, L. Le problème de l'enseignement et du développement mental à l'âge scolaire (1933), in B. Shneuwly et J.P. Bronckart (eds), *Vygotsky aujourd'hui*, Delachaux et Nieslté, 1985, 95-117.
162. WALLON H. *Les origines de la pensée chez l'enfant* (1945), PUF, rééd. 1989.
163. WALLON H. *L'évolution psychologique de l'enfant* (1941), Armand Colin, 2002.
164. *Fiches Lycée* du Comité de Liaison entre les Enseignants et les Astronomes (CLEA).
165. Les extraits des écrits de Léonard de Vinci sont disponibles sur le site : <http://www.snof.org/vinci>

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Modèle géométrique de la diffusion. Un point de la surface de l'objet renvoie une partie de la lumière reçue dans toutes les directions.	13
Figure 2 : Première approche du modèle géométrique de la vision. L'œil situé sur le trajet d'un pinceau divergent issu d'un point de l'objet peut localiser le point et accommoder en conséquence. En revanche, la localisation est impossible si le faisceau est remplacé par un rayon unique provenant de l'objet. Sur ce dessin, la lumière incidente n'est pas représentée.	14
Figure 3 : Schéma de l'œil par René Descartes.	15
Figure 4 : Schématisation de la formation de l'image rétinienne. A un point A de l'objet correspond un point-image A' sur la rétine par l'intermédiaire de faisceaux divergents puis convergents. Ici il s'agit d'une représentation de l'œil réduit où le système optique de l'œil est remplacé par une lentille convergente. (Dessin de l'œil d'après Descartes). La double flèche remplace le système convergent équivalent à l'ensemble cornée + cristallin.	16
Figure 5 : Structure de la rétine. (Source : Rodieck, 1998)	19
Figure 6 : Schéma général du fonctionnement d'un photorécepteur. Ce schéma est volontairement simplifié par nous-même.	20
Figure 7 : Représentation géométrique de l'intensité énergétique et de la luminance. O est le point d'émission des photons, Ω désigne l'angle solide du cône d'émission, S, la surface traversée par le flux énergétique, et σ la surface perpendiculaire à l'axe d'émission traversée par le même flux que la surface S. (Source : Rodieck, 1998).	23
Figure 8 : Courbe de sensibilité spectrale appelée également courbe de visibilité de l'œil ou encore courbe d'efficacité lumineuse (source : Ronchi, 1966). Elle représente la réponse d'un œil moyen aux radiations de diverses longueurs d'onde. La courbe en trait plein correspond à la vision de jour (vision photopique), celle en tirets à la vision de nuit (vision scotopique). Cette courbe est construite pour un observateur moyen sur un champ de vision centrale de 10°. Ce diagramme a été adopté par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.), par convention internationale en 1964 et permet la définition d'un observateur de référence.	24
Figure 9 : Courbe d'estimation du diamètre pupillaire moyen (en mm) en fonction de la luminance moyenne (en cd/m ²). La région gris clair montre les variations individuelles enregistrées chez douze sujets. (source : Rodieck, 1998)	26
Figure 10 : Représentation schématisée simplifiée du mécanisme de la vision. Le trait en pointillé permet de distinguer l'espace proprement physique de l'espace psychique. En outre, les flèches en traits pleins représentent la lumière (incidente et diffusée), tandis que les flèches en pointillés figurent la propagation du signal nerveux à l'intérieur du système visuel.	27
Figure 11 : Modèle simplifié du mécanisme optique de la vision, présenté sous la forme d'une chaîne.	28
Figure 12 : Organigramme représentant les tendances de raisonnement des élèves à propos de la vision. L'expression « lien directionnel » fait référence aux raisonnements dans lesquels les élèves indiquent explicitement le sens du lien qui unit les éléments en jeu dans leur explication du mécanisme de la vision.	56
Figure 13 : Dessin illustrant la réponse de Stanislas. Parce que Stanislas ne sait pas encore écrire, nous avons pris la liberté de légender son dessin en respectant fidèlement ses propres commentaires.	66
Figure 14 : Dessins de Marion. Les légendes ont été ajoutées par nous-même, sous la dictée de Marion. Les trois dessins ont été réalisés successivement de haut en bas, sous	

forme de production séquentielle, tout en étant simultanément commentés par la suite par Marion.	69
Figure 15 : Dessin de Miléna. Les flèches représentent la « lumière qui va vers le stylo et après sur moi, parce que le stylo est plus près de la lampe ».	70
Figure 16 : Dessin de Franck. La flèche qui part du Soleil désigne « la lumière qui éclaire ». La flèche issue du personnage représente « la vue ».	73
Figure 17 : Dessin de Geoffroy accompagné du commentaire suivant : « le Soleil il éclaire la fleur, et le bonhomme il envoi des trucs, des rayons de voit, et ça lui permet de voir la fleur ». Jusqu'à ce qu'on lui demande de représenter la vision, Geoffroy n'a pas dit que les yeux envoyait « quelque chose ». Ce n'est qu'au moment du dessin qu'il apporte cette précision.	74
Figure 18 : Questionnaire proposé à 227 élèves de quatrième, avant l'enseignement d'optique.	82
Figure 19 : Dessin attendu pour la réponse à la question n°2, à condition que les flèches désignent explicitement le trajet de la lumière.	84
Figure 20 : Synthèse des réponses à la question n°1. Les nombres en gras indiquent le nombre d'élèves dont les réponses se rapprochent des catégories référencées.	90
Figure 21 : Synthèse des résultats obtenus à la question n°2. Ces résultats concernent uniquement les réponses des élèves ayant représenté des flèches sur le dessin, soient 204 élèves sur les 227 interrogés (90% du total).	92
Figure 22 : Répartition des réponses obtenues en réponse à la question n°2. Les pourcentages sont donnés par rapport à la totalité des réponses, c'est-à-dire pour les 227 élèves.	99
Figure 23 : Alhazen, dessin anatomique de l'œil.	138
Figure 24 : Schéma représentant le phénomène de diffusion selon Alhazen	140
Figure 25 : Planches anatomiques de Felix Plater	150
Figure 26 : Kepler : fonctionnement de la chambre obscure. A gauche, la figure KLM de la source ponctuelle E a la forme de l'ouverture FGH de la chambre. A droite, la figure FGH de la source large NOP à travers l'ouverture ponctuelle Q a la forme de la source NOP.	155
Figure 27 : Interprétation géométrique de la figure obtenue dans une chambre noire lors d'une éclipse de Soleil selon le modèle de Kepler. A chaque point de la partie non dissimulée du Soleil correspond une tache sur l'écran de la chambre noire.	156
Figure 28 : Proposition schématique de la vision selon le modèle d'Alhazen (un rayon unique issu d'un point de l'objet pénètre l'œil) et de Kepler (un faisceau issu d'un point de l'objet pénètre l'œil à travers la pupille).	157
Figure 29 : Kepler, formation d'une image à travers une sphère transparente. A un point I de l'objet correspond un point-image M sur l'écran par le jeu d'une double réfraction à la surface de la sphère d'eau.	158
Figure 30 : La vision selon Kepler. A un point A correspond un point a sur la rétine par l'intermédiaire de faisceaux divergents puis convergents.	160
Figure 31 : La densité lumineuse de la surface la plus éloignée du point-source est quatre fois moins importante que celle de la seconde surface.	162
Figure 32 : Le triangle distanciométrique de Kepler	163
Figure 33 : Schématisation de la diffusion proposé par Descartes. Dans le cas d'une surface lisse et plane D, les rayons sont renvoyés dans une direction privilégiée. Dans le cas d'une surface convexe E, les rayons divergent ; dans le cas d'une surface concave F, les rayons convergent. Les surfaces « inégales » (ou rugueuses) M et L peuvent renvoyer les rayons dans des directions aléatoires.	166

Figure 34 :Schéma de Descartes représentant la marche des rayons à travers une sphère transparente. Les rayons issus de A subissent deux réfraction consécutives.	167
Figure 35 : La vision selon Descartes. Aux points-objets VXY correspondent trois points-images RST sur la rétine.	168
Figure 36 : Dessin de l'œil proposé par Descartes. L désigne le cristallin, GHI la rétine, FF, la prunelle, BC la cornée, M, l'humeur vitrée.	169
Figure 37 : Losange didactique. Cette représentation modélise une situation d'enseignement-apprentissage. Elle intègre une dimension épistémologique (i.e. la façon dont le savoir scientifique se construit en référence au monde matériel), et une dimension pédagogique fondée sur les théories de l'apprentissage. Cette dimension renvoie aux stratégies mises en œuvre par l'enseignant pour favoriser l'apprentissage. Ce modèle tient compte des représentations des élèves symbolisées par l'axe « élèves-monde matériel ».	192
Figure 38 : Organigramme représentant la structure du <i>Dialogue sur les manières dont se fait la vision</i> . Les flèches en traits pleins représentent l'itinéraire cognitif du texte. La flèche en pointillés désigne le parcours habituellement emprunté par l'enseignement.	194
Figure 39 : Représentation de l'œil du chat éclairé par une faible quantité de lumière (œil du haut), et par une quantité importante de lumière (œil du bas).	206
Figure 40 : Photographie d'une fleur éclairée en lumière blanche.	207
Figure 41 : Dessin d'Océane	209
Figure 42 : Dessin d'Océane rectifié par Thomas	210
Figure 43 : Dessin réalisé conjointement par Camille et Annabelle (binôme 1). « L'œil envoie son regard vers la maison qui est éclairée par le Soleil ».	210
Figure 44 : Dessin d'Etienne. Les flèches représentent le trajet de la lumière diffusée par l'objet. Elle arrive en quantité importante dans l'œil du dessin n°1 et en faible quantité dans l'œil du dessin n°2.	220
Figure 45 : Dessin de Camille et Annabelle (binôme 1) rectifié à l'issue de la lecture intégrale du <i>Dialogue</i> et légendé par nos soins. Les commentaires reprennent ceux des élèves au moment où elles modifient leur dessin.	225

ANNEXE 1 :

Éléments historiques concernant la controverse
autour de l'existence du vide

Controverse à propos de la preuve de l'existence du vide

La controverse qui nous occupe se déroule dans l'Angleterre des années 1660. Elle porte sur la preuve de l'existence du vide et voit s'affronter les physiciens Robert Boyle (1627-1691) et Thomas Hobbes (1588-1679). Si nous avons choisi de nous intéresser au concept de « vide », c'est qu'il présente, selon nous, certaines similitudes avec le concept de « lumière » tel qu'il est défini dans les théories de la vision. Comme la lumière, le vide est un objet invisible ; il n'est concevable que par une expérience de pensée. En outre, les manifestations sensibles de sa présence peuvent faire l'objet d'interprétations diverses comme en témoignent les débats suscités au milieu du 17^e siècle par l'expérience de Toricelli. Après avoir rappelé les enjeux de cette expérience, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la façon dont la querelle opposant vacuistes (convaincus de l'existence du vide) et plénistes (persuadés du contraire) a pris fin.

Un tube scellé à l'une de ses extrémités est rempli de mercure et retourné dans un récipient contenant la même substance et de l'eau (voir). Cette expérience, réalisée pour la première en 1643 par le physicien italien Evangelista Toricelli, est décrite par Blaise Pascal dans un essai consacré aux expériences nouvelles touchant le vide :

En Italie, on éprouva qu'un tuyau de verre de quatre pieds, dont un bout est ouvert et l'autre est scellé hermétiquement, étant rempli de vif-argent, puis l'ouverture bouchée avec le doigt ou autrement, et le tuyau disposé perpendiculairement à l'horizon, l'ouverture bouchée étant vers le bas, et plongée deux ou trois doigts dans d'autre vif-argent et l'autre moitié d'eau. Si on débouche l'ouverture du tuyau, le vif-argent descend en partie, laissant au haut du tuyau un espace vide en apparence, le bas du même tuyau demeurant plein du même vif-argent jusqu'à une certaine hauteur. Et si on hausse un peu le tuyau jusqu'à ce que son ouverture, qui trempait auparavant dans le vif-argent du vaisseau, sortant de ce vif argent, arrive à la région de l'eau, le vif argent du tuyau monte jusqu'en eau avec l'eau ; et ces deux liqueurs se brouillent dans le tuyau ; mais enfin, tout le vif-argent tombe, et le tuyau se trouve tout plein d'eau³⁴⁸.

Un espace (appelé espace toricellien) apparaît donc au sommet du tube qui deviendra l'objet d'une polémique portant à la fois sur la nature de cet espace « vide en apparence » (est-il ou non du vide ?) et sur le statut même l'expérience (cette expérience prouve-t-elle irréfutablement l'existence du vide ?). De fait, les explications de l'expérience de Toricelli sont nombreuses et divergentes. Et c'est précisément parce que l'espace dont il est question

³⁴⁸ Pascal B. Expériences nouvelles touchant le vide (1647) in *Oeuvres Complètes*, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, rééd.1954, p. 362.

est transparent qu'il peut être sujet à toutes les interprétations : soit il est effectivement vide, soit il est constitué d'une matière invisible. Pour certains cette matière consiste en l'air extérieur au tube qui serait passé à travers les pores du verre. C'est la cas notamment de Hobbes :

Aucune des expériences effectuées par vous ou par d'autres avec du mercure ne permet de conclure à l'existence du vide, car la matière subtile contenue dans l'air étant pressée contre le mercure, passera à travers lui et à travers tout autre corps fluide, quel que soit l'état de leur fusion. Tout comme la fumée passe à travers l'eau³⁴⁹.

Pour d'autres (héritiers de la pensée scolastique), en l'air contenu dans les pores du vif-argent. Pour Descartes l'espace toricellien ne peut pas être vide car il transmet la lumière³⁵⁰. Il est rempli d'une forme de matière subtile que Descartes nomme « esprit du vif-argent ».

A l'inverse, Pascal est convaincu que le vide n'est pas une chose impossible dans la nature et « qu'elle ne le fuit pas avec tant d'horreur que plusieurs se l'imaginent »³⁵¹. En outre, il affirme que cette expérience est capable de convaincre ceux qui sont les plus préoccupés de l'impossibilité du vide.

Aucune des matières qui tombent sous nos sens, et dont nous avons connaissance, ne remplit cet espace vide en apparence. Mon sentiment sera, jusqu'à ce qu'on m'ait montré l'existence de quelle matière qui le remplisse, qu'il est véritablement vide, et destitué de toute matière³⁵².

L'argument essentiel de Pascal tient au fait que si l'eau monte dans l'espace laissé apparemment vide, c'est que celui-ci ne contient aucune matière. Si cela n'était pas la cas, Pascal se demande où irait cette matière au moment où l'eau s'introduit dans l'espace.

³⁴⁹ Hobbes cité par Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, op. cit. p. 87.

³⁵⁰ Ses études sur la propagation de la lumière amène Descartes à nier également l'existence du vide. Pour lui, la lumière consiste en un mouvement de particules des corps lumineux au moyen duquel ces particules peuvent pousser en tout sens la matière subtile qui remplit les pores des corps transparents. Cette matière subtile serait constituée de globules durs qui transmettraient en un instant l'action de la lumière. La vision est le résultat de l'impression de la lumière sur nos yeux au moyen de ces globules. Si le vide existait, la vision serait impossible car la présence des globules est nécessaire : « Pensez que n'y ayant point de vide en la Nature, ainsi que presque tous les philosophes avouent, et néanmoins y ayant plusieurs pores en tous les corps que nous apercevons autour de nous, ainsi que l'expérience peut montrer fort clairement ; il est nécessaire que ces pores soient remplis de quelque matière fort subtile et fort fluide, qui s'étende sans interruption depuis les astres jusqu'à nous », Descartes R. *La dioptrique*, op. cit. Cet argument rejeté par Pascal pour qui la nature de la lumière est insuffisamment connue pour pouvoir en faire un outil de raisonnement : « Remettons cette preuve au temps où nous aurons l'intelligence de la nature de la lumière. », Pascal B. *Expériences nouvelles touchant le vide*, ibid. p.372.

³⁵¹ Pascal B. *Expériences nouvelles touchant le vide* (1647) op. cit. p. 363.

³⁵² Ibid. p. 369.

Pourtant nombreux sont ceux qui, niant l'existence du vide, interprètent l'espace de Torricelli comme un lieu rempli d'une substance certes invisible, mais non dénuée de matière. Convaincu de l'existence du vide, Pascal étudie également les effets de la pesanteur de la masse de l'air. Il suppose que si l'on enlevait entièrement l'air au-dessus du vaisseau rempli de vif-argent, alors : « le vif-argent du tuyau tomberait entièrement, puisqu'il n'y aurait plus aucun air pour le contre-peser »³⁵³. Cette proposition expérimentale sera réalisée quelques années plus tard par Robert Boyle grâce à la création et à l'utilisation de sa pompe à air.

Nous voyons là comment l'espace torricellien fut sujet à controverse. La nature de cet espace transparent est au centre des débats scientifiques de la moitié du 17^e siècle. Et si ces débats nous intéressent, c'est qu'ils portent sur un objet qui peut se laisser appréhender par des idées antagonistes incluant l'idée de vide (idées vacuistes), ou au contraire de matière invisible (idées plénistes), et qu'*a priori*, aucune expérience ne peut trancher en faveur de l'une ou l'autre des ces idées. Les expériences proposées par Pascal peuvent s'interpréter, et ce fut d'ailleurs le cas, dans le contexte des idées vacuistes ou dans celui des idées plénistes. De même en est-il des expériences de Boyle, comme nous allons le voir maintenant. Pourtant, les idées vacuistes finiront par s'imposer. Et cela en partie grâce à la pratique discursive adoptée par Boyle pour asseoir sa théorie, celle du dialogue³⁵⁴.

En 1660, Robert Boyle reprend une partie des expériences de Pascal et les réalise dans le vide, grâce à une machine de son invention (la pompe à air), capable, selon lui, de créer un espace dénué de toute matière.

L'une des expériences de Boyle à laquelle nous allons nous intéresser est celle que Shapin et Shaffer nomment l'expérience « du vide dans le vide »³⁵⁵. Il s'agit d'introduire le dispositif de Torricelli dans la pompe à air, puis de purger l'air du récipient. Lorsque le pompage commence, le niveau du mercure contenu dans le tube baisse à cause de la diminution de la pression de l'air dans le récipient. Même si cette expérience peut apparaître comme une

³⁵³ Ibid. p. 449.

³⁵⁴ Notre propos sera très largement inspiré de l'ouvrage des historiens des sciences Steven Shapin et Simon Shaffer, *Leviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, trad. T. Piélat, La Découverte, Paris, 1993.

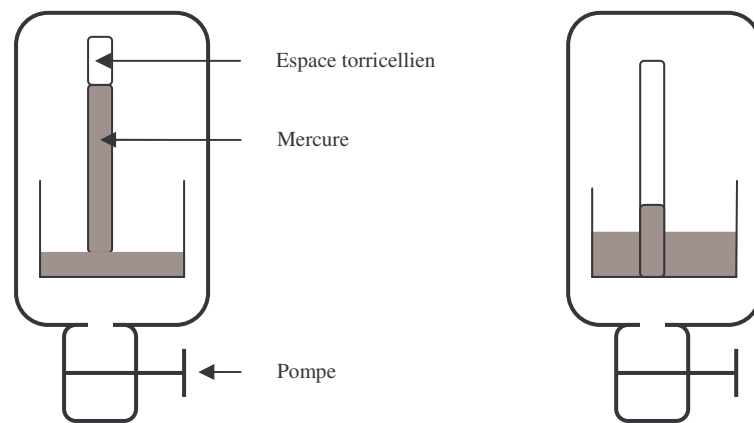
³⁵⁵ Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, op. cit. p. 44.

contribution au débat autour de la nature de l'espace torricellien (est-il ou non du vide ?), en réalité, la préoccupation essentielle de Boyle n'est pas d'apporter une réponse à cette question. Dans les *New experiments*, Boyle professe sa répugnance à aborder « une question si subtile » et « n'ose prendre sur lui de résoudre une controverse si difficile ». Il ajoute :

Mon propos essentiel n'est pas d'établir des théories et des principes, mais d'imaginer des expériences et d'enrichir l'histoire naturelle d'observations effectuées et décrites avec exactitude³⁵⁶.

Pas plus que le tube de Torricelli, la pompe à air ne permet de savoir si le vide existe ou non. En revanche, l'expérience du « vide dans le vide » permet montrer qu'en purgeant le récipient, celui-ci perd l'air qui y était présent. Cette perte se manifeste par la baisse du niveau de mercure dans le tube (voir figure ci-dessous). Il donne alors au vide un sens expérimental :

J'entends par vide, non point un espace dans lequel il n'y a strictement aucun corps, mais qui est, soit complètement, soit presque totalement dépourvu d'air³⁵⁷.



Dispositif de Boyle avant pompage : Le mercure contenu dans le tube ne descend pas entièrement du fait de la pression de l'air à l'intérieur de la cloche.

Dispositif de Boyle après pompage : Le mercure est descendu dans le tube du fait de la diminution de la quantité d'air contenu dans la cloche.

Boyle ne cherche pas se prononcer contre ou en faveur du vide, mais à montrer que l'expérience de la pompe à air permet la mise en évidence de certains faits, qui peuvent être à l'origine d'une connaissance nouvelle : ici, la pression de l'air (qui inclut chez Boyle l'idée de

³⁵⁶ Ibid. p. 170.

³⁵⁷ Robert Boyle, *New experiments* (1660), cité par Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, op. cit. p. 50.

ressort et de pesanteur)³⁵⁸. Boyle ne cherche plus à raisonner sur une entité particulière mais sur la quantité d'air présente à l'intérieur de la cloche de la pompe à vide.

³⁵⁸ Pour plus de détail, voir Shapin S. et Shaffer S., *Leviathan et la pompe à air*, op. cit. 55-59.

ANNEXE 2 :

L'utilisation d'une controverse sous la forme dialoguée, un exemple en mécanique

L'utilisation d'une controverse historique en situation d'apprentissage : le *Dialogue* de Galilée

La séquence que nous présentons maintenant s'inscrit dans le cadre du programme de mécanique de la classe de troisième (programmes de 1998), et plus spécifiquement dans la partie consacrée aux référentiels. A ce niveau, il s'agit pour les élèves de construire l'idée que le mouvement d'un corps dépend de l'endroit que l'on choisit pour décrire ce mouvement. Autrement dit, un même corps peut être simultanément immobile et en mouvement, tout dépend du référentiel que l'on choisit, l'endroit par rapport auquel le mouvement sera étudié :

1. Un point sur les raisonnements communs à propos des référentiels

L'exemple le plus couramment utilisé dans l'enseignement est celui de deux passagers assis face à face dans un train animé d'une vitesse constante. Lorsque le train roule, les passagers sont immobiles l'un par rapport à l'autre, mais en mouvement par rapport au quai, qui, lui-même est en mouvement par rapport aux passagers. Cet exemple ne pose, en général, aucune difficulté de compréhension, mais il permet aux élèves de concevoir qu'il n'existe pas de corps en mouvement dans l'absolu, pas plus qu'il n'existe d'immobilité absolue : les passagers sont immobiles dans le référentiel du train, et en mouvement dans le référentiel du quai. Dire que les passagers sont immobiles dans le référentiel du train signifie qu'ils se déplacent à la même vitesse que le train par rapport au quai. De même qu'une personne immobile sur un tapis roulant se déplace à la même vitesse que le tapis par rapport au couloir. Or, les études de raisonnement réalisées sur ce thème ont montré que la plupart des élèves (et des étudiants) interrogés expliquent la vitesse des passagers par une cause unique : le train³⁵⁹. Pour ces élèves, si les passagers sont en mouvement c'est parce qu'ils sont en contact avec le train et que celui-ci les « entraîne » :

Lorsque la vitesse cesse d'être comprise comme intrinsèque, c'est le plus souvent parce qu'il y a 'entraînement', c'est-à-dire action d'un moteur sur un support, deux éléments d'analyse aussi matériels l'un que l'autre. Mais le fait que l'entraînement soit compris comme une cause de mouvement pour l'objet entraîné conduit, par ricochet, à penser que la vitesse correspondante disparaît en même temps que le lien physique³⁶⁰.

³⁵⁹ Pour une synthèse de ces travaux, voir Viennot L. Monde réel, grandeurs intrinsèques, in *Raisonner en physique, la part du sens commun*, op. cit. chapitre 3, 59-72. Voir également notre introduction.

³⁶⁰ Ibid. p. 70.

Pour la pensée pré-scientifique, lorsque deux corps A et B en contact sont en mouvement, c'est que l'un (A) joue le rôle de moteur pour l'autre (B). Si le contact entre A et B est rompu, alors B perd instantanément la vitesse correspond à l'action de A sur B. Ce type de raisonnement conduit à prévoir qu'une bille lancée verticalement vers le haut par une personne immobile sur le tapis roulant (animé d'une vitesse constante) tombera derrière cette personne. Dans ce cas, l'absence de lien physique avec la personne (et donc avec le tapis roulant) supprime la composante horizontale de la vitesse de la bille. Ne subsiste alors plus que le mouvement vertical. Or, la bille conserve le mouvement du tapis roulant même lorsqu'elle n'est plus en contact avec le tapis. De ce fait, elle tombera au pied du lanceur (ou dans ses mains s'il cherche à la rattraper).

2. L'étude des mouvements : enjeux d'une controverse historique

L'idée que le mouvement d'un corps nécessite l'action d'un moteur est l'un des fondements des théories aristotéliennes du mouvement :

Tout mû est nécessairement mû par quelque chose : d'une part en effet, s'il n'a pas en soi le principe du mouvement, évidemment il est mû par une autre chose, car c'est un autre chose qui sera le moteur³⁶¹.

Il n'est pas question ici de parler de similitudes entre la pensée d'Aristote et celle des élèves et des étudiants. Nous avons souligné en introduction les réserves émises par de nombreux auteurs à ce sujet, et le philosophe Alexandre Koyré nous rappelle que la physique d'Aristote ne relève pas d'un prolongement du sens commun :

La physique d'Aristote est une théorie hautement élaborée, bien que non mathématique. Ce n'est ni un prolongement brut et verbal du sens commun, ni une fantaisie enfantine, mais bien une théorie, c'est-à-dire une doctrine qui, partant bien entendu des données du sens commun, les soumet à une élaboration systématique extrêmement cohérente et sévère³⁶².

Nous n'entrerons pas dans la complexité de la physique aristotélienne. Signalons simplement que cette physique est en partie fondée sur la recherche des causes du changement ou du mouvement des corps. Pour Aristote il existe des mouvements « naturels » et des

³⁶¹ Aristote, *Leçons de physique*, trad. J. Barthélemy Saint Hilaire, Presses Pocket, livre VII, chapitre 1, p. 191.

³⁶² Koyré A. *Etudes Galiléennes*, Hermann, Paris, 1966, p. 384.

mouvements « violents » ou « contre-nature ». Aux mouvements violents sont associées des causes dites « efficientes » c'est-à-dire l'action d'un « moteur »³⁶³. En outre, pour que le mouvement violent soit possible, il est nécessaire que le moteur et le mobile soient en contact :

Pour que le mouvement ait lieu il faut (...) le contact du moteur qui souffre alors en même temps qu'il agit. Mais toujours le mouvant apportera quelque forme à l'être qu'il meut, soit en substance, soit en qualité, soit en quantité, laquelle forme sera le principe et la cause du mouvement quand le mouvant le donne. (...) Le moteur est par cela seul qu'il peut mouvoir ; le mouvant est, parce qu'il agit et meut. Il est l'agent du mobile, et, par conséquent, il n'y a qu'un seul acte pour le moteur et le mobile également³⁶⁴.

Si le contact du mobile avec le moteur est rompu, alors seul subsiste le mouvement naturel qui tend à faire tomber le mobile verticalement vers son lieu naturel, c'est à dire le sol. Un tel raisonnement conduit Aristote à affirmer que la Terre est immobile, parce que si tel n'était pas le cas, les corps lâchés verticalement ne pourraient pas, de ce fait, retomber à la verticale de leur point de lancer. La preuve de l'immobilité de la Terre est suspendue, dès lors, aux théories aristotéliennes du mouvement, et à un principe de causalité particulier³⁶⁵ : une Terre en mouvement serait un moteur pour tous les corps en contact avec elle, et notamment pour une pierre posée dans la main d'un lanceur immobile. Cette pierre serait donc en mouvement parce qu'entraînée par la Terre. Dès lors que la pierre quitterait la main du lanceur, elle perdrait instantanément le mouvement le la Terre au profit du mouvement naturel qui la conduirait à tomber verticalement et vers le bas, loin du lanceur, qui toujours entraîné par la Terre, se serait éloigné de la pierre. Et comme la pierre tombe au pied du lanceur c'est que la

³⁶³ Selon Aristote, tout changement, y compris ceux qui sont en train de se produire, à quatre causes : matérielle, efficiente, formelle et global. Dans le cas d'une statue, par exemple, la cause matérielle de son existence est le marbre ; la cause efficiente, la force exercée sur le marbre par les instruments du sculpteur ; la cause formelle, la forme idéalisée de l'objet présente depuis le début dans l'esprit du sculpteur ; et la cause finale, l'accroissement des beaux objets dans la société grecque. Ainsi, toute génération ou production se caractérise par la forme qu'elle réalise, la matière qu'elle informe, le moteur qui l'effectue et la perfection à laquelle elle tend. Le science classique semble n'avoir conservé des causes aristotéliennes que les causes efficientes et formelles, seules capables d'expliquer les changements qualité ou de position. Les savants se sont d'ailleurs longtemps opposés sur ce terrain, les uns défendant l'idée de causes formelles, directement associées aux mouvements naturels et seules aptes à éclairer la chute des corps, par exemple ; les autres, comme René Descartes, partisans des causes efficientes et farouchement opposés à toute idée de mouvement naturel. Voir à ce sujet, Ross D. *Aristote* (1953), trad. J. Samuel, Archives Contemporaines, 2000. Voir également Kuhn T. *La tension essentielle, tradition et changement dans les sciences*, op. cit. ainsi que Koyré A. *Etudes galiléennes*, op. cit.

³⁶⁴ Aristote, *Leçons de physique*, op. cit. livre III, chapitre 2, 181-182.

³⁶⁵ En réalité, selon le principe d'inertie, les corps ainsi lâchés tomberaient verticalement que la Terre soit ou non en mouvement. L'expérience évoquée par Aristote ne permet donc pas de conclure à l'immobilité ou la mobilité de la Terre, ce que Galilée tentera de montrer dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*.

Terre est immobile. Un raisonnement analogue conduit à conclure qu'une pierre lâché du haut du mât d'un navire voguant à vitesse constante sur la mer tombe derrière le mât.

Le problème de la chute de la pierre sur le navire fera l'objet de nombreuses discussions au cours des siècles qui suivront. Nous n'entendons pas reprendre ici le contenu des débats qui animent la science des périodes médiévale et pré-classique autour de cette question³⁶⁶. Nous retiendrons néanmoins que si certains savants affirment dès la fin du 16^e siècle que la pierre lâchée du haut du mât du navire tombe au pied du mât, ils invoquent en général la nécessité d'une cause inscrite dans la pierre elle-même, une « vertu impressée » transmise par le navire à la pierre. Ainsi pour Giordano Bruno³⁶⁷ :

... la pierre, ou toute autre chose grave, jetée du mât vers un point situé au pied du dit mât, ou en quelque partie de la cale ou du corps du navire, y viendra en ligne droite (...) La pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu impressée, que ne possède pas l'autre, celle qui vient dans la main de celui qui est en dehors du navire³⁶⁸.

En 1642, Gassendi rompt avec les conceptions médiévales du mouvement et avec l'*impetus*. Pour lui, le mouvement de la pierre n'est pas lié cause à une cause interne à la pierre, à une « force active » qui lui serait communiquée par le navire :

Il paraît que la force active, qui est la cause de la projection, est dans le projetant lui-même, et nullement dans la chose projetée, qui est purement passive. Ce qu'il y a dans la chose

³⁶⁶ On trouvera une revue complète des discussions autour du mouvement des corps dans la science pré-galiléenne dans Koyré A. *Etudes galiléennes*, op. cit. Voir également Rosmorduc, J. Histoire et pédagogie de la mécanique, *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n°8, novembre 1978 et Viennot L. Quelques faits d'histoire des sciences, *Le raisonnement en dynamique élémentaire*, chapitre VII, Hermann, 1979, 113-130.

³⁶⁷ Cette « vertu impressée » est directement héritée de l'*impetus* des savants médiévaux. Au 14^e siècle, le recteur de l'académie de Paris, Jean Buridan, affirme que le mouvement d'un objet implique nécessairement la présence d'un *impetus*, véritable vertu motrice stockée dans cet objet mobile : « Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain *impetus*, une certaine puissance capable de mouvoir ce mobile, que ce soit vers le haut, ou vers le bas, ou de côté, ou circulairement. Plus grande est la vitesse avec laquelle le moteur meut le mobile, plus puissant est l'*impetus* qu'il imprime en lui. C'est cet *impetus* qui meut la pierre, après que celui qui la lance a cessé de la mouvoir ; mais par la résistance de l'air et aussi par la pesanteur qui incline la pierre à se mouvoir en un sens contraire à celui vers lequel l'*impetus* a puissance de mouvoir, cet *impetus* s'affaiblit continuellement ; dès lors, le mouvement de la pierre se ralentit sans cesse. Cet *impetus* finit par être vaincu et détruit, à tel point que la gravité l'emporte sur lui, et désormais meut la pierre vers lieu naturel ». Cet *impetus* dont l'existence est due à une cause externe, se consume peu à peu du fait de la résistance de l'air et de la gravité³⁶⁷. Du moteur initial, le projectile reçoit un *impetus*, fonction croissante de la vitesse du moteur, cause du mouvement une fois le moteur arrêté, finalement vaincu par les forces de résistance. Jean Buridan cité par Jean Rosmorduc, Histoire et pédagogie de la mécanique, *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, novembre 1978, n°8. A noter qu'avant Buridan, un byzantin du 6^e siècle du nom de Jean Philopon avait contesté les conceptions d'Aristote sur le mouvement des projectiles. Pour Philopon, « il reste dans le corps, après qu'on lui a imprimé le mouvement, une certaine vertu mouvante qui se conserve pendant un certain temps », cité par Rosmorduc, ibid.

³⁶⁸ Giordano Bruno, *De motu*, , cité par Koyré A. *Etudes Galiléennes*, op. cit. p. 316.

projetée, c'est du mouvement, lequel, bien qu'il soit appelé force, *impetus*, etc. n'est cependant en réalité, rien d'autre que le mouvement même... Or rien n'empêche que le moteur soit séparé, ou même périsse, et que le mouvement reçu perdure. Car on ne requiert pas le moteur afin que, en dehors du mouvement, il transmette au mobile une force, qui ensuite produirait le mouvement ; mais il suffit qu'il produise dans le mobile un mouvement, qui puisse continuer sans lui. Or le mouvement peut le faire, car telle est la propriété de sa nature, pourvu qu'il ait un sujet perdurable, et que rien de contraire ne lui arrive ; il a la propriété de persévérer sans action continue de sa cause³⁶⁹.

Autrement dit, le mouvement est à considérer pour lui-même, et il n'a pas besoin de cause pour « persévérer » : le principe d'inertie vient d'être énoncé. Ajoutons qu'en 1641 Gassendi apporte la preuve expérimentale du lieu de chute de la pierre lâchée du haut du mât :

Monsieur Gassendi ayant été toujours très curieux de chercher à justifier par les expériences, les hypothèses que le passé lui propose, et se trouvant à Marseille en l'an 1641, fit voir sur une galère qui sortit exprès en mer, qu'une pierre lâchée du haut d'un mât, tandis que la galère voguait avec toute force, ne tombe point ailleurs qu'elle ne le ferait si la même galère était restée immobile. Cette expérience fut faite en présence de Monseigneur le Comte d'Allais et d'un grand nombre de personnes qui y assistaient³⁷⁰.

Quelques années avant Gassendi, Galilée s'intéresse lui-aussi au problème de la chute des corps, et de celle, désormais célèbre, de la pierre lâchée du haut du mât. Dans un passage du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, le personnage de Salviati affirme que la pierre tombe au pied du mât, et ce, que le bateau soit en mouvement ou non (voir extrait ci-dessous). Par une argumentation cinématique davantage fondée sur l'étude du mouvement de la pierre pour lui-même que sur la recherche dynamique d'une cause interne à la pierre (Salviati parle de « mouvement communiqué » et non de « force » ou de « vertu impressée »), Salviati cherche à convaincre Simplicio, qui, par un raisonnement inspiré de la pensée aristotélicienne, conclut au contraire que le point de chute de la pierre se situera derrière le bateau. Or, si comme le dit Salviati, la pierre tombe au pied du mât que le bateau soit, ou non, en mouvement, le point de chute de la pierre ne nous renseigne en rien sur l'état de repos ou de mouvement du navire. D'une façon analogue, le lieu de chute d'une pierre lâchée du haut d'une tour ne permet pas de conclure à l'immobilité ou la mobilité de la Terre.

Le dialogue ci-dessous rend compte de la discussion entre Salviati et Simplicio à ce sujet. Pour les besoins de notre séquence, nous avons pris la liberté de supprimer du texte original de

³⁶⁹ Gassendi, *De motu*, cité par Viennot L. *Le raisonnement spontané en physique élémentaire*, op. cit. 122-123.

³⁷⁰ Koyré A. *Etudes Galiléennes*, Hermann, Paris, 1966, p. 225.

Galilée les passages digressifs sans lien direct la démarche que nous entendons proposer aux élèves.

Salviati :	Aristote prétend que la Terre est immobile puisque nous voyons les projectiles lancés vers le haut, à la verticale, revenir sur la même ligne au lieu d'où ils ont été lancés(...). Or, cela ne pourrait arriver si la Terre se mouvait, car, pendant le temps où le projectile, séparé de la Terre, monte et descend, le lieu d'où on l'a lancé aurait, du fait de la révolution de la Terre, parcouru un long chemin vers le Levant. (...)
Simplicio :	Bien sûr ! Si la terre se mouvait, le mouvement de la pierre serait en effet transversal et non vertical. Il y a par ailleurs l'expérience si caractéristique de la pierre qu'on lance du haut du mât d'un navire : quand le navire est au repos, elle tombe au pied du mât ; quand le navire est en route, elle tombe à une distance du pied [du mât] égale à celle dont le navire a avancé pendant le temps de chute de la pierre ; et cela fait un bon nombre de coudée quand la course du navire est rapide. (...)
Salviati :	Vous dites, puisque, lorsque le navire est immobile, la pierre tombe au pied du mât, et tombe loin de lui lorsque le navire se meut, on peut en déduire, réciproquement, que si la pierre tombe au pied du mât, le navire est immobile et que si elle tombe loin de lui, le navire se meut ; et comme ce qui se produit sur le navire doit pareillement se produire sur la Terre, le fait que la pierre tombe au pied de la tour implique nécessairement que le globe terrestre soit immobile. C'est bien là votre raisonnement, n'est ce pas ?
Simplicio :	C'est très précisément cela, et votre résumé en facilite beaucoup la compréhension (...)
Salviati :	Et moi, sans avoir fait l'expérience, je suis sûr que la pierre tombera au pied du mât. (...) Car la pierre qui est au sommet du mât, emportée par le navire, a en elle un mouvement indélébile imprimé par le navire. Quand celle-ci est lâchée, elle garde ce mouvement ; elle parcourt donc la même vitesse horizontale que le bateau, dans le même temps, tout en tombant verticalement. (...)
Simplicio :	La conclusion ultime à laquelle vous faites allusion, c'est sans doute que, si son mouvement lui a été imprimé de façon indélébile, la pierre n'abandonnera pas le navire, mais le suivra, pour tomber finalement au même endroit que lorsque le navire est à l'arrêt.

Extrait du *Dialogue* de Galilée³⁷¹.

La difficulté essentielle de Salviati est de reconnaître que le mouvement de la pierre ne dépend pas du contact avec le navire, et qu'il peut perdurer même lorsque le contact entre la pierre et le navire est rompu. Cette difficulté est analogue à celle que l'on trouve chez les élèves et les étudiants confrontés au même problème³⁷².

³⁷¹ Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, op. cit. extrait de la deuxième journée, 164-174.

³⁷² Ce qui est paradoxal ici (et nous l'évoquions dans notre introduction), c'est que les étudiants justifient le mouvement des projectiles par un élan imprimé. Cet élan présente des caractéristiques communes avec l'*impetus* médiéval. Mais alors que les savants pré-galiléens affirment, avec raison, que la pierre tombera au pied du mât (en utilisant un raisonnement erroné fondé sur l'*impetus*), les élèves, tout aussi adeptes de l'idée de cause imprimée dans l'objet, prévoient que la pierre tombera derrière le mât.

Notre séquence d'enseignement est construite à partir de l'extrait ci-dessus³⁷³. Elle s'appuie sur une possible identification des élèves à Simplicio qui devrait conduire, selon nous, à ce qu'il est convenu d'appeler un conflit-cognitif : si les élèves se reconnaissent dans les idées de Simplicio et admettent avec lui que la pierre lâchée du haut du mât du navire tombe derrière le mât, alors ils constateront peut-être que la transposition de cette situation à celle d'une pierre lâchée du haut d'une tour amène à conclure à l'immobilité de la Terre, par un raisonnement du type : « la pierre tombe au pied du mât uniquement lorsque le bateau est immobile, or la pierre tombe au pied de la tour, donc la terre est immobile et pourtant je sais que la Terre tourne sur elle-même ». Cette situation conflictuelle devrait conduire l'élève à mettre en place un raisonnement nouveau qui rende compatible la réalité de l'expérience avec celle du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même. L'histoire des sciences, est ici un moyen d'aider l'élève à construire un nouveau système de pensée proche de celui de Salviati, intégrant l'idée d'une transmissibilité du mouvement³⁷⁴.

3. Le problème de la chute de la pierre : présentation de la séquence d'enseignement

La Terre qui nous héberge tourne sur elle-même en 24 heures environ. Du fait de ce mouvement, un point situé à sa surface, à Paris par exemple, se déplace avec une vitesse de 950 kilomètres par heure, soit quelques 264 mètres par seconde³⁷⁵. Mais notre perception de nous même et des choses que nous voyons nous pousse à croire que celle-ci est immobile. Nos expériences sensibles, à elles seules, ne nous livrent aucune information sur le mouvement de notre planète : l'alternance des jours et des nuits peut parfaitement s'expliquer par un mouvement de rotation du Soleil autour de la Terre. Pourtant les élèves d'aujourd'hui

³⁷³ Il existe dans la littérature pédagogique quelques propositions de séquences construites à partir du *Dialogue* de Galilée. On citera par exemple celle des *fiches pédagogiques pour le lycée* proposées par le CLEA (Centre de liaison entre les enseignants et les astronomes).

³⁷⁴ Cet objectif va bien sans doute bien au-delà des exigences du programme de troisième, mais l'intérêt de notre séquence réside essentiellement dans le fait de mesurer l'impact pédagogique et didactique d'un outil à composante historique. En outre, son objectif est une étude particulière des référentiels construite à partir de ce que nous savons des conceptions des élèves à propos du mouvement, dans le but de les modifier. Or les conceptions de nos élèves sur ce thème ne devraient pas différer de celles des nombreuses études de conceptions réalisées jusqu'à présent.

³⁷⁵ Seul le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même sera concerné par notre étude.

savent que la Terre tourne sur elle-même. L'objectif de la séquence proposée n'est donc pas d'amener les élèves à redécouvrir la mobilité de la Terre, mais de confronter une connaissance, celle du mouvement terrestre, avec leurs conceptions du mouvement.

Notre séquence d'enseignement est construite en cinq étapes, répartis sur deux séances d'une heure chacune. En préambule à la séance, nous présentons le *Dialogue* en disant simplement qu'il s'agit d'un ouvrage écrit au 17^e par un savant italien du nom de Galilée dans lequel des personnages discutent de physique (et plus particulièrement d'astronomie).

Première séance : Problème de la chute d'une pierre

Dans un premier temps, nous demandons aux élèves de prévoir le lieu de chute d'une pierre lâchée du haut d'une tour. Cette question ne devrait pas poser de difficulté et la réponse devrait être conforme à celle que nous attendons, c'est-à-dire : « au pied de la tour ». Puis, nous leur posons la même question, mais cette fois dans le cas où la pierre est lâchée du haut du mât d'un navire voguant sur l'eau. Nous leur précisons qu'ils peuvent accompagner leur réponse d'un schéma.

Ainsi que nous l'avons vu au début de ce chapitre, depuis les premières études de conceptions sur le mouvement réalisées il y a plus de vingt ans, nous savons que la pensée pré-scientifique refuse l'idée de continuité du mouvement d'un corps lorsque le contact entre celui-ci et l'objet mobile dont il « dépendait » est rompu. Instruit par ces résultats, nous nous attendons à ce que les élèves raisonnent de la sorte : « pendant que la pierre tombe, le bateau continue d'avancer » et prédisent que « la pierre tombera derrière le bateau. » Ensuite, nous leur demandons de comparer leur prévision avec celles proposées par Simplicio et par Salviati dans l'extrait du *Dialogue* ci-dessous :

Simplico :	Il y a l'expérience si caractéristique de la pierre qu'on lance du haut du mât d'un navire : quand le navire est au repos, elle tombe au pied du mât ; quand le navire est en route, elle tombe à une distance du pied [du mât] égale à celle dont le navire a avancé pendant le temps de chute de la pierre ; et cela fait un bon nombre de coudée quand la course du navire est rapide.
Salviati :	Et moi, sans avoir fait l'expérience, je suis sûr que la pierre tombera au pied du mât. ³⁷⁶

Extrait du *Dialogue* proposé aux élèves lors de la séance n°1.

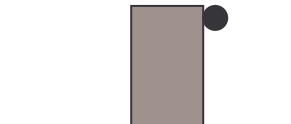
La phrase de Simplicio devrait conforter les élèves dans leur raisonnement. Cette première étape correspond au questionnaire distribué aux élèves (voir page suivante).

³⁷⁶ Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, op. cit.

Classe de 3ème
La chute des graves (1/4)

Imaginez qu'on lâche une pierre du dernier étage d'un immeuble de 10 étages. Où tombera cette pierre ?

- ☐ Au pied de la tour ?
☐ Derrière la tour ?
☐ Devant la tour ?



Justifiez votre réponse

Imaginez maintenant que cette même pierre soit lâchée du haut du mat d'un navire en mouvement uniforme sur une mer parfaitement calme. Où tombera cette pierre ?

- ☐ Au pied du mat du bateau ?
☐ Derrière le bateau ?
☐ Devant le bateau ?

c

Simplicio : Il y a l'expérience si caractéristique de la pierre qu'on lance du haut du mât d'un navire : quand le navire est au repos, elle tombe au pied du mât ; quand le navire est en route, elle tombe à une distance du pied [du mât] égale à celle dont le navire a avancé pendant le temps de chute de la pierre ; et cela fait un bon nombre de coudée quand la course du navire est rapide.

Salviati : Et moi, sans avoir fait l'expérience, je suis sûr que la pierre tombera au pied du mat.

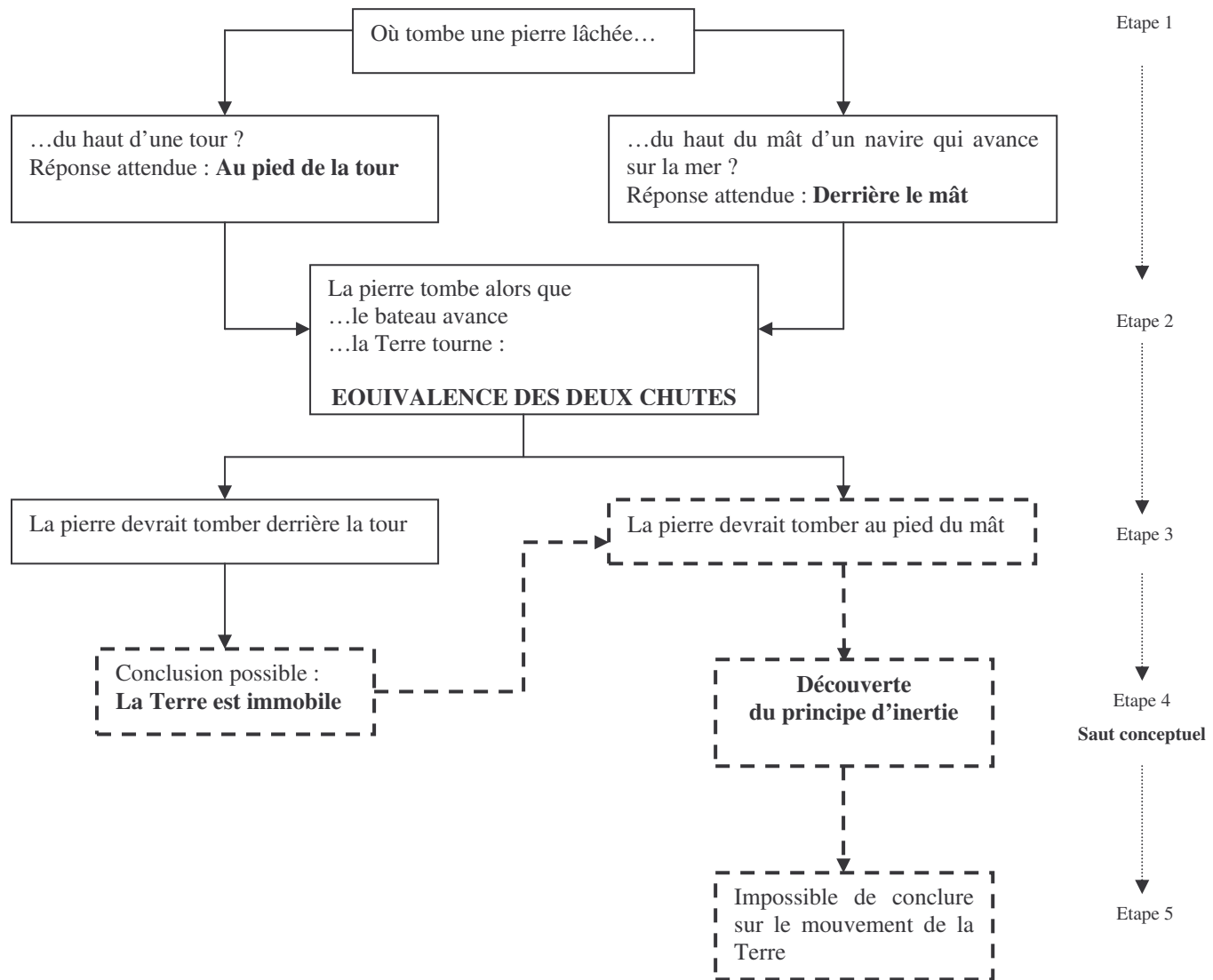
NB : on précise que la pierre est suffisamment lourde pour que l'on puisse négliger l'effet de l'air. On rappelle en outre que la Terre tourne sur elle-même à raison de 1 tour par 24 heure, ce qui équivaut, pour un point situé à la surface de la Terre (à Paris par exemple) à environ 260 mètres par seconde.

Questionnaire « chute des graves », séance n°1.

Si la majorité des élèves sera sans doute convaincue que la pierre tombe derrière le mât, quelques uns se risqueront peut-être à prévoir que la pierre tombe au pied du mât. Dans une perspective socio-constructiviste nous pensons qu'il sera nécessaire d'instaurer un espace d'échange collectif à ce moment de la séance, afin de leur permettre de formuler un discours argumenté.

Pour conclure cette première séance, nous proposons aux élèves de considérer les deux chutes du point de vue du mouvement du bateau et de celui de la Terre. Notre objectif est qu'ils

reconnaissent que ces deux chutes sont en fait équivalentes. Par conséquent, le raisonnement qui les amène à prévoir que la pierre tombe derrière le mât, devrait pareillement les amener à conclure, soit que la pierre ne tombe pas au pied de la tour mais derrière elle (ce qui est contraire à l'expérience quotidienne), soit que la Terre est immobile (ce que les élèves tiennent pour incorrect). Cette ambiguïté pourrait conduire les élèves à revoir leur prévision concernant la chute de la pierre lâchée du haut du mat, et donc, à se ranger du côté de Salviati : la pierre lâchée du haut du mât du navire devrait tomber au pied de ce mât et non derrière lui. C'est sur cette nouvelle hypothèse que devrait s'achever notre première séance.



Organigramme représentant la démarche de pensée proposée aux élèves lors de la séance n°1 sur la chute des graves. Les pointillés correspondent à une situation instable et conflictuelle qui devrait conduire les élèves à modifier leur raisonnement afin de conclure que la pierre tombe au pied du mât et non derrière lui.

Deuxième séance : découverte du principe d'inertie

L'objectif de notre séance est alors de les amener à formuler une hypothèse permettant d'expliquer la raison pour laquelle la pierre tombe, contre toute attente, au pied du mât. Nous leur proposerons de construire leur hypothèse par écrit et par groupe, en leur précisant qu'ils pourront, s'ils le souhaitent, faire des schémas. Cette nouvelle phase de recherche constitue la 4^e étape de notre séquence. Cette étape nécessite de rompre avec un raisonnement de sens commun : proposer une première approche du principe d'inertie relève de ce que nous avons appelé en introduction un « saut conceptuel », d'un cheminement de pensée associé à un

effort d'abstraction important. En outre, nous ne proposons ici aucune vérification expérimentale.

En référence aux recherches didactiques antérieures, nous pouvons nous attendre à ce que certains élèves justifient le mouvement de la pierre par un raisonnement proche de celui de l'*impetus*, dans lequel apparaîtrait l'idée de transmission par le bateau d'une « force », ou d'un « élan » qui permettrait à la pierre de conserver sa vitesse horizontale pendant un certain temps. Toutefois, cette séquence est réalisée avant tout enseignement de mécanique sur les forces. Quoiqu'il en soit, nous inviterons alors les élèves à lire l'ensemble du texte présenté plus haut, de façon à ce qu'ils confrontent leurs hypothèses à l'explication proposée par Salviati : la pierre possède un mouvement qui lui a été « imprimé » par le navire, et non une « force » : ce mouvement perdure même lorsque le lien entre le bateau et la pierre est rompu. Cette confrontation a pour objet d'accompagner les élèves dans l'accomplissement du « saut » que nous évoquions à plus haut, et de conforter ceux qui formuleront l'hypothèse d'une transmission du mouvement dans leur choix.

4. Déroulement et Analyse de la séquence

Cette séquence, d'une durée totale de deux heures fut réalisée au mois de janvier 2002 dans trois classes de troisième d'un collège d'Aulnay sous Bois (93), dans le cadre du cours de mécanique de sciences physiques. Elle concernait au total 71 élèves de niveaux très hétérogènes. Des espaces d'échanges collectifs alternaient avec des temps de réflexion individuels ou en binômes. Dans l'une des classes, la séquence a été intégralement enregistrée. L'essentiel de notre analyse portera sur les effets de l'interaction texte-élèves. En particulier, nous regarderons la façon dont les élèves s'approprient le texte, et comment ils se positionnent par rapport aux personnages de ce texte. Nous tenterons de faire ressortir les éléments qui, de notre point de vue, font du support choisi un outil d'apprentissage potentiel.

Première séance : Problème de la chute d'une pierre

La séance débute par la présentation du *Dialogue* Galilée :

Nous allons travailler aujourd'hui à partir d'un texte écrit au 17^e siècle par un savant italien nommé Galilée. Dans ce texte, deux personnages Simplicio et Salviati discutent d'un problème. Et ils ne sont pas d'accord sur la façon de résoudre ce problème. Ce problème, je vais vous le poser à vous, et vous allez essayer d'y répondre. A la fin, on verra lequel des deux a raison.

Suite à cette petite introduction, nous leur distribuons le questionnaire ci-dessus et nous leur laissons vingt minutes pour le compléter.

Question n°1 : Imaginez qu'on lâche une pierre du dernier étage d'un immeuble de 10 étages. Où tombera cette pierre ?

Conformément à nos attentes, la plupart des élèves interrogés (96% de l'ensemble des élèves) prévoit que la pierre tombera au pied de la tour. Pour Nadia, « La pierre tombe au pied de la tour car il n'y a aucun vent et aucun obstacle » et pour Mehdi : « Elle tombe au pied de la tour car elle n'est pas lancée mais lâchée ».

Au pied de la tour	68	96%
Devant la tour	2	3%
Derrière la tour	1	1%
TOTAL	N=71	100%

Répartition des réponses à la question de la chute de la pierre du haut de la tour.

Deux élèves répondent que la pierre tombera devant la tour. Pour eux, il n'est pas possible de lâcher une pierre de sorte que son mouvement soit parfaitement vertical, comme nous l'explique Laura : « La pierre tombera devant la tour parce qu'elle ne peut pas tomber exactement tout droit si on la lâche, ça sera forcément un peu dévié ». L'idée que la pierre puisse tomber derrière la tour est évoquée par une élève :

La Terre tourne sur elle-même avec une vitesse de 260 m/s alors j'en déduis que la pierre tombera derrière la tour. (Cong).

Dans sa réponse, Cong fait appel à une donnée de l'énoncé : la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même. A notre grand étonnement, elle justifie sa réponse par un argument que nous nous attendions à trouver en réponse à la deuxième question.

Question n°2 : Imaginez maintenant que cette même pierre soit lâchée du haut du mat d'un navire en mouvement uniforme sur une mer parfaitement calme. Où tombera cette pierre ? Justifiez votre réponse et comparez-là à celles de Simplicio et de Salviati dans cet extrait du *Dialogue* de Galilée :

Là encore, les réponses des élèves à cette deuxième question viennent confirmer nos prévisions (voir tableau ci-après).

Au pied du mat	8	11%
A l'avant du bateau	2	3%
A l'arrière du bateau	61	86%
TOTAL	N=71	100%

Répartition des réponses à la question de la chute de la pierre du haut du mât d'un navire voguant sur l'eau à vitesse constante.

86% de l'ensemble des élèves interrogés prévoient que la pierre tombe derrière le mât. La plupart justifient leur réponse par une explication proche de celle que nous nous attendions à trouver. Ainsi pour Franck :

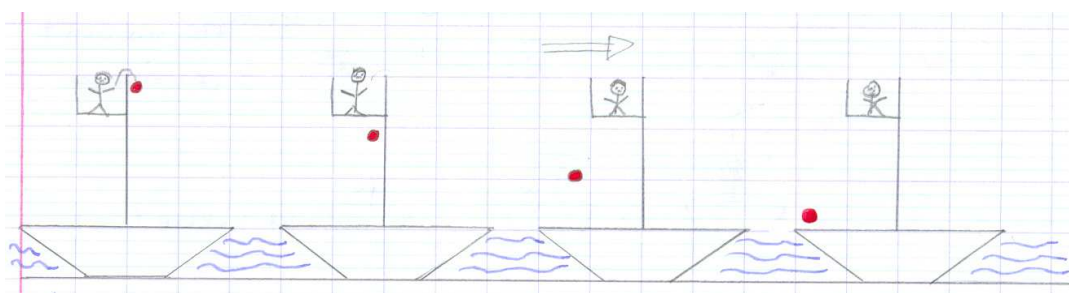
La pierre touchera le sol en arrière, parce que quand le bateau avance, la pierre tombe et pendant ce temps là, la pierre elle n'avance plus, elle ne change pas de trajectoire, elle tombe tout droit. A notre avis, c'est Simplicio qui a raison.

Pour la grande majorité des élèves interrogés lorsque la pierre quitte la main du lanceur, celle-ci perd instantanément toute la vitesse que lui procurait le navire :

Je pense comme Simplicio. La pierre tombe derrière le bateau car le bateau bouge et la pierre, dès qu'elle est lâchée, elle n'avance plus donc elle tombe tout droit pendant le bateau, lui, il avance toujours. (Christopher)

Seul le contact justifiait le fait que la pierre avançait avec le navire. Le contact était la cause du mouvement horizontal de la pierre. Le contact étant rompu, le mouvement horizontal disparaît ; ne subsiste alors plus que le mouvement vertical. Certaines réponses sont accompagnées de dessins, comme celle de Sarah (voir dessin ci-dessous) qui explique que :

Dans l'air, la pierre tombe toujours droite alors que le bateau avance. Il y a forcément un décalage de position de la pierre par rapport au bateau. C'est donc que la pierre tombe à l'arrière. Je suis d'accord avec Simplicio.



Dessin prédictif de Sarah en réponse à la question de la chute de la pierre du haut du mât du navire.

Nous avons noté qu'au cours de leur réflexion certains élèves ont simulé l'expérience avec des objets de leur trousse. Par exemple, l'un d'eux tenant une gomme immobile au dessus de

la table, faisait avancer un stylo sur la table. Lorsque le stylo est passé sous la gomme, l'élève a lâché la gomme. Il a alors pu constater que la gomme tombait derrière le stylo. Sa situation expérimentale n'était évidemment pas conforme à celle décrite précédemment, puisque dans la situation expérimentale de l'élève, le stylo était immobile.

Une partie des élèves interrogés (11% de l'ensemble) semble raisonner selon une intuition galiléenne, et prévoit que la pierre tombera au pied du mât. Pour Julie :

Le bateau est en mouvement alors la pierre suivra le mouvement du bateau et tombera au pied du mat, moi, je pense que c'est Salviati qui a raison.

et pour Kimnara :

La pierre tombera au pied du mat parce que quand la pierre est lâchée d'en haut, elle a toujours la vitesse du bateau donc elle avance en même temps que le mât. Simplicio a faux.

Signalons que lorsque les élèves justifient leur choix (c'est le cas pour 6 d'entre eux, soit 8% de l'ensemble), parlent de « mouvement » ou de « vitesse », mais jamais de « force ». Enfin, il est intéressant de retenir que 84% des élèves interrogés comparent explicitement leur réponse à celle de Simplicio ou de Salviati de façon cohérente. Les autres expliqueront quelques minutes plus tard oralement que le texte proposé leur a semblé très difficile à comprendre.

Analyse des réponses au questionnaire et émergence d'un conflit-cognitif et socio-cognitif

A l'issue de cette première étape nous ramassons les questionnaires, et nous proposons aux élèves de confronter leurs opinions lors d'un débat ouvert initié de la façon suivante :

Prof : Alors, d'après vous, qui a raison, Simplicio ou Salviati ? Selim ?³⁷⁷

S : Simplicio, parce que le bateau avance toujours quand la pierre tombe, et pas elle.

Prof : Pourquoi pas elle ?

S : Parce qu'elle est plus accrochée au bateau.

Prof : Tout le monde est d'accord avec Selim ?

K : Non

Prof : Kimnara, qu'en penses-tu ? Tu es de l'avis de Simplicio ?

K : Non

Prof : Pourquoi ?

K : Parce que la pierre elle a la même vitesse que le bateau, même quand // quand elle est plus accrochée, comme il dit Selim, elle continue à avancer quand même, en même temps.

³⁷⁷ Pour la retranscription des entretiens, Prof désigne le chercheur (nous-même), E1...En, les élèves lorsque nous n'avons pas pu les identifier. La lettre C correspond à une réponse collective et enfin, les élèves identifiés sont désignés par l'initiale de leur prénom.

L'échange dure quelques minutes. Tous les élèves s'impliquent dans la discussion, et ils semblent globalement très impatients de savoir qui, de Simplicio ou de Salviati, a raison. Nous poursuivons la séance dans le but de leur faire admettre l'équivalence des deux problèmes :

- Prof : Est-ce que la Terre est immobile ?
 C : Non !
 Prof : Rachida ?
 R : Elle tourne, sur elle-même, comme ça, et autour du Soleil.
 Prof : Mais alors, si la Terre tourne, c'est comme pour le bateau non ? Comment se fait-il que la pierre tombe derrière le mât et pas derrière la tour ? C'est pas pareil ?

Globalement, les élèves admettent sans trop de difficulté l'équivalence des deux situations, mais très vite, ils ne comprennent plus pourquoi les réponses qu'ils ont formulées ne sont pas identiques. Pour certains d'entre eux, cela est dû à la différence entre la vitesse de déplacement du bateau et celle de la Terre :

- E1 : C'est parce que la Terre elle tourne pas vite du tout, d'ailleurs, on s'en rend même pas compte.
 E2 : Mais si, elle tourne grave vite, t'as pas vu la vitesse ou quoi ? 260 mètres par seconde... ça fait... ça fait combien madame en kilomètre/heure ?
 Prof : environ 950 km/h.
 E2 : T'as vu, c'est plus vite que le bateau, alors la pierre elle devrait atterrir, loin derrière.
 Cong : Moi c'est bien ce que j'avais dit, la pierre elle tombe derrière la tour³⁷⁸.
 E1 : Pff, n'importe quoi.

Les élèves ayant répondu comme Simplicio reconnaissent que leur raisonnement est bancal car il conduit à conclure que la Terre est immobile. Toutefois, certains viennent à en douter :

- E : Si ça se trouve, c'est n'importe quoi que la Terre elle tourne !
 C : Mais bien sûr elle tourne !
 N : Ah ! En fait, on s'est trompé sur le bateau peut-être...
 Prof : Pourquoi, Nordine ?
 N : Parce que la Terre elle tourne et pourtant la pierre elle tombe en bas de l'immeuble // de la tour / et le bateau il bouge alors c'est pareil, **ça doit avoir le même raisonnement.**
 E : Oui c'est pareil, ça doit tomber en bas du mat.
 N : Mais ils avaient qu'à faire l'expérience et voilà, hop, on voit, c'est tout.
 Prof : Ils l'ont faite l'expérience, mais plus tard, en 1641, dans le port de Marseille, à l'initiative de monsieur Gassendi
 E4 : Et ils ont trouvé quoi ?
 Prof : A votre avis ?
 N : Au pied du mat j'parie
 E : Non, derrière !
 N : Mais non, pas derrière, sinon ça veut dire que dans la tour ça tomber derrière aussi.

³⁷⁸ Voir la réponse proposée par Cong.

Nous rappelons à ce moment-là que certains parmi eux ont émis une hypothèse qui pourrait expliquer que la pierre tombe au pied du mât.

Prof : Et les élèves qui ont dit que la pierre tombait au pied du mât, comment vous l'avez justifié ? Julie ?

J : Ben, parce qu'en fait, elle garde la vitesse du bateau.

Prof : Les autres, vous en pensez quoi ? Alexandre ?

A : En tout cas, si c'est ça, évidemment ça tombe au pied.

Prof : Brahim, tu n'as pas l'air d'accord ?

B : Non, enfin si, je suis d'accord quand ils sont collés, là d'accord, la pierre elle a la même vitesse que le bateau. Mais après, quand elle tombe, elle le touche plus, donc // donc elle a plus de vitesse.

Cette séance s'achève dans une ambiance étrange. La plupart des élèves comprend que si les deux problèmes sont équivalents alors la pierre doit tomber au pied du mât. Mais cela leur semble tellement improbable qu'ils se disent que finalement les problèmes ne sont peut-être pas comparables. Une élève quitte la salle de classe en disant que :

Comme la Terre tourne en rond et que le bateau avance tout doit, c'est peut-être ce qui explique que la pierre ne tombe pas au même endroit. (Jennifer).

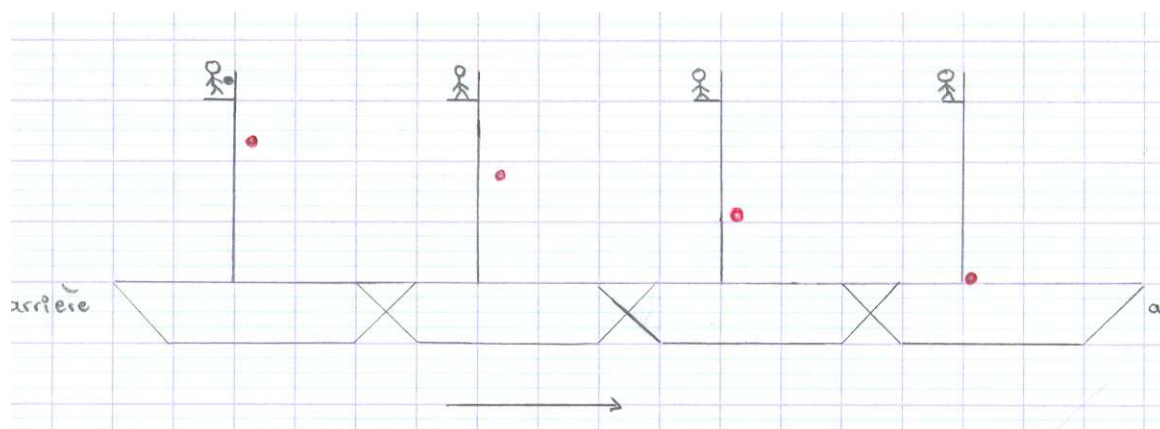
Ajoutons que dans les trois classes, les élèves ont spontanément évoqué l'idée d'une vérification expérimentale.

Deuxième séance : A la recherche du principe d'inertie

Nous débutons la séance par un rappel des enjeux de la séance précédente. Puis, nous décidons d'apporter quelques précisions sur le *Dialogue* que nous leur avons présenté. En particulier, nous leur expliquons que Simplicio défend les idées d'un savant grecs du nom d'Aristote, et que Salviati se pose en défenseur d'une pensée révolutionnaire, celle de Galilée, lui-même. Ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous souhaitons leur montrer que le problème de la chute des graves est de taille et que leur perplexité est historiquement légitimée. Ensuite, nous entendons que les élèves profitent d'une possible identification de leurs idées à celles d'éminents savants: les élèves qui se reconnaissent dans les idées de Simplicio (et donc dans celles d'Aristote), trouveront peut-être leur « erreur » moins dévalorisante ; quant à ceux qui se reconnaissent dans les idées de Salviati (et donc dans celles de Galilée), ils en retireront sans doute une grande satisfaction. Nous leur expliquons donc que « la question de la chute de la pierre a été au cœur de discussions très animées entre des savants renommés, et ce, pendant plusieurs siècles, jusqu'à ce que Galilée en donne une réponse qui sera confirmée par l'expérience de Gassendi quelques années plus tard. »

Comme la séance précédente le laissait entendre, la prévision correcte est bien celle de Salviati. Il s'agit maintenant pour eux de trouver une explication qui justifie cette prévision. Nous leur proposons de construire une hypothèse par groupe de deux, en leur précisant qu'ils peuvent, s'ils le souhaitent, faire des dessins. Certains reprennent les schémas des positions successives du bateau et placent chaque fois la pierre à une distance du mât identique à celle de départ (voir dessin ci-dessous) :

Tu vois, si la pierre elle tombe là [au pied du mât], ça veut dire qu'elle reste toujours collée au mât quand elle tombe. Bon, donc, elle va à la même vitesse que le bateau. C'est bizarre quand même // Mais ça doit être ça, elle doit garder la vitesse. (Sarah).



Dessin réalisé par le groupe de Sarah pour illustrer l'idée de transmission du mouvement.

Après dix minutes de discussions en groupe, nous initions un nouveau débat :

Prof : Est-ce qu'un groupe peut proposer une explication qui permette de comprendre pourquoi la pierre tombe au pied du mât, de la même façon qu'elle tombe au pied de l'immeuble ? Sarah ?

S : Nous on pense que c'est possible si la pierre a toujours la même vitesse que le bateau.

E : Oui mais quand elle part du mât, elle a plus de vitesse.

S : Elle doit bien la garder sinon elle tomberait derrière.

Prof : Est-ce que d'autres parmi vous pensent que la pierre garde la vitesse du bateau ? Nordine ?

N : Oui, nous on pense qu'elle suit le bateau à la même vitesse que lui, parce qu'il lui donne la vitesse.

Prof : Certains d'entre vous l'avaient déjà dit ça, non ? Yacine, Kimnara ?

Y : Nous on le dit depuis le début, personne veut nous croire.

Que ce soit dans l'une ou l'autre des classes, quelques binômes ont avancé l'idée d'une vitesse qui se serait transmise du bateau vers la pierre. Aucun binôme ne parle de « force ». C'est bien une expérience par la pensée qui conduit Sarah et son groupe à conclure que la pierre « doit garder la vitesse » du bateau. L'hypothèse du lieu de chute de la pierre (au pied du mât) permet à certains élèves de construire ce que Feyereabend appelle « une nouvelle

idée », c'est-à-dire, une explication proche de celle de Salviati qui consiste en une première formulation du principe d'inertie. Afin de conforter les élèves dans leur démarche, nous leur proposons de confronter leurs explications avec la théorie de Salviati en leur distribuant l'intégralité du dialogue (voir plus haut).

Après avoir lu le texte proposé, la plupart des élèves expriment leur satisfaction et leur fierté :

- Prof : Alors, quelle est l'explication proposée par Salviati, enfin, par Galilée ? Linda ?
 L : Il dit la même chose que nous.
 S : Ouais, on est trop fort !
 Prof : Bon, mais c'est-à-dire ? Il dit quoi exactement ?
 L : Que le bateau il imprime sa vitesse à la pierre, et après c'est indélébile, ça veut dire que ça s'en va pas, même quand la pierre est lâchée.
 Prof : Oui, c'est exactement ça. Rachid, tu as quelque chose à dire ?
 R : Rien, je disais // Ça veut dire qu'on est aussi intelligent que Galilée ?

Cette question de Rachid et l'enthousiasme de nombreux élèves montrent que l'identification au savant est particulièrement valorisante, à la fois pour les élèves qui se reconnaissent dans l'explication de Salviati, mais également pour ceux qui, n'ayant pas trouvé d'explication satisfaisante, réalisent que certains de leurs camarades en sont capables. Quelques-uns refusent néanmoins d'admettre que le mouvement du navire puisse être « imprimé dans la pierre de façon indélébile » et demeurent convaincus que la pierre tombe au pied du mât. Les propos de Salviati ne font pas autorité car pour ces élèves « l'explication ne remplace pas une expérience », seule façon selon eux de « voir qui a raison ». Ces mêmes élèves peinent d'ailleurs à reconnaître l'équivalence des deux chutes et font du problème du navire une question à part entière. Nous rappelons alors l'expérience réalisée par Gassendi, mais celle-ci reste abstraite car les élèves « ne la voient pas ».

A l'issue de la séquence, certains élèves expriment le souhait de travailler à nouveau selon une modalité identique. Nous leur demandons alors d'expliquer pour quelles raisons :

- B : Parce que quand on se trompe, on a moins la honte si des savants comme // comment il s'appelle déjà ?
 Prof : Aristote ?
 B : Oui, Aristote. Et ben, Aristote, finalement il dit que la pierre tombe au pied du mât, presque comme tout le monde.
 E : Sauf que, il y en a c'est encore mieux, direct, ils disent comme Galilée.
 B : Oui, mais après, on arrive à changer d'avis, et on trouve comme Galilée sans que la prof elle nous dise la réponse. Enfin si / juste que ça tombe en bas du mât. Après on trouve l'explication.
 Prof : Bon, donc un cours comme ça, ça vous plaît parce que vous vous rendez compte que vous raisonnez comme de grands savants. C'est tout ? Mohamed ?
 M : Non, aussi on peut discuter entre nous. Des fois on est pas d'accord, il faut essayer de se convaincre. Comme eux, là [*Mohamed montre le texte*], ils sont pas d'accord.

Cet échange est instructif à plusieurs titres. En comparant son raisonnement avec celui d'Aristote, l'élève dédramatise la portée de son erreur : Aristote raisonne « presque comme tout le monde » nous dit Brahim, réalisant ainsi que le fait de se tromper n'est pas nécessairement condamnable. En outre, les élèves sont majoritairement conscients du cheminement intellectuel qui les conduit à formuler une première approche du principe d'inertie : « on arrive à changer d'avis (...), on trouve comme Galilée (...), on trouve l'explication ». Cette prise de conscience relève d'un acte métacognitif dans lequel l'élève analyse les tâches accomplies, les procédures suivies, et les résultats obtenus. Dans l'extrait ci-dessus, Brahim souligne qu'il a eu besoin de savoir que la pierre tombait au pied du mât pour avancer « sans que la prof nous dise la réponse ». Enfin, les élèves sont satisfaits d'avoir pu discuter entre eux, et Mohamed compare explicitement leurs divergences à celles des protagonistes du *Dialogue*.

Au cours de notre analyse, nous nous sommes attaché à considérer les réactions des élèves au regard des différentes tâches qui leur étaient proposées (formulation d'hypothèse, échanges collectifs, confrontation à l'autorité savante) du point de vue de la cognition et de la motivation. Notre intention était de dégager les éléments qui, de notre point de vue, pouvaient justifier l'utilisation en classe du *Dialogue* de Galilée.

**CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES INTERACTIONS ENTRE
HISTOIRE ET DIDACTIQUE DES SCIENCES**
**Elaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision
pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation**

par Cécile de HOSSON

Résumé :

Cette recherche a pour objet l'élaboration et l'évaluation d'un outil d'enseignement du mécanisme optique de la vision fondé sur l'histoire des théories de la vision reconstruite selon une approche rationnelle. Une analyse des raisonnements d'enfants de maternelle et d'élèves de 4^e avant enseignement d'optique à propos de la vision permet de caractériser les difficultés liées au savoir concerné : associer la vision à l'entrée de la lumière dans l'œil. Les élèves interrogés n'associent l'entrée de la lumière dans l'œil qu'à l'éblouissement, situation où la vision est impossible. Ils expliquent la vision soit dans un sens œil-objet soit dans un sens objet-œil (partie 1). L'histoire antique et médiévale est témoin d'idées analogues : comme les élèves, les savants s'opposent sur le sens de la vue. En traitant la lumière de façon quantitative, Alhazen ouvre la voie à un consensus et propose dès le 11^e siècle de considérer la lumière comme un *stimulus* de la vue (partie 2). L'outil d'enseignement proposé est construit en référence au cheminement historique : il intègre la controverse du sens de la vue et la solution quantitative d'Alhazen. Ces idées constituent la trame d'un texte (un dialogue) présenté à des élèves de 4^e avant enseignement, lors d'entretiens en binômes, en respectant un scénario didactique approprié. L'analyse de ces entretiens montre que le processus d'apprentissage est favorisé par l'identification des élèves aux savants mis en scène, et indique une prise de conscience de leur acte cognitif qui profite de l'approche quantitative (partie 3). Un transfert de cette modalité d'enseignement à d'autres domaines de la physique semble envisageable (annexes).

Spécialité : Didactique des disciplines

Option : Didactique des sciences physiques

Mots-clés : didactique de la physique, histoire des sciences, lumière, vision, raisonnements, séquence d'enseignement, école primaire, collège.